



André Almeida **PLANEAMENTO DE PRODUÇÃO**
Francisco **NA AUTONEUM SETÚBAL, LDA**

Desenvolvimento de um modelo de auxílio na tomada de decisão em relação ao plano de produção na fábrica

Trabalho de Projeto submetido como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia de Produção**

Júri

Presidente Doutor José Filipe Castanheira Pereira Antunes Simões, ESTSetúbal/IPS

Orientador Doutor Sérgio Flores Fernandes, ESTSetúbal/IPS

Arguente Doutora Inês Marques Proença, Instituto Superior Técnico/UL

julho de 2020

*Dedicado ao meu filho Gonçalo, por tudo o que veio
representar na minha vida!*

Agradecimentos

Sempre soube que seria uma caminhada difícil, mas era a minha ambição e por muito trabalhosa que fosse, e certamente com alguns contratemplos, sabia que este dia iria chegar! Com muita força, trabalho e dedicação este dia chegou e o meu profundo agradecimento vai para todos aqueles que contribuíram para este dia.

Primeiramente gostaria de agradecer à Autoneum Setúbal, pela total disponibilidade, que sem a sua cooperação não existiria a oportunidade de desenvolver esta dissertação. Um especial obrigado ao meu chefe Sr. Gonçalo Silva (Responsável PC&L) pela oportunidade, por acreditar no meu valor, no meu trabalho e apostar em mim.

Pela orientação tenho a agradecer ao Professor Sérgio Fernandes, por me ter aceitado e ter tornado tudo possível, a sua colaboração, o seu aconselhamento, os seus ensinamentos e a sua disponibilidade que sempre teve para me ajudar. Tenho também a agradecer ao meu orientador no Departamento de Produção, o Sr. Tiago Rocha (Responsável de Produção), pela sua disponibilidade, ensinamentos, experiência e aconselhamentos muito valorosos.

Agradeço a todos os que trabalharam comigo nestes quase dois anos de Autoneum Setúbal, todos contribuíram para esta projeto, mas tenho de destacar o contributo do meu colega Engenheiro Gonçalo Salgueiro, pelo apoio, experiência e conhecimentos.

Não poderia esquecer os meus pais pelo total apoio e por me disponibilizarem todas as condições para que esta caminhada tivesse um final feliz.

E por fim, agradecer à minha namorada Patrícia Silva, por tudo e algo mais, mas o seu apoio incondicional, incentivo, acreditar no meu valor e no meu sucesso, tornaram-se preponderantes nesta ambição, neste projeto, neste Mestrado!

A todos os que tornaram isto possível:

Um muito obrigado.

Resumo

O presente projeto foi desenvolvido no âmbito do Mestrado em Engenharia de Produção, no Instituto Politécnico de Setúbal. O estudo de caso incide sobre a indústria de componentes de automóveis, nomeadamente sobre o grupo Autoneum, uma empresa multinacional Suíça a operar em Portugal. Nas instalações fabris de Setúbal (Autoneum Setúbal) são produzidos os acústicos e isolantes térmicos (*heatshields*).

Com o conceito eficiência cada vez mais presente na indústria, grandes investimentos estão a ser feitos nas áreas de Investigação e Desenvolvimento (I&D) dos produtos e Tecnologias de Informação (TI) com o objetivo de aumentar lucros e melhorar a eficiência dos processos. É neste contexto que surge este projeto.

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma ferramenta que auxilie a gestão e administração da empresa na etapa de planeamento da produção, nomeadamente a tomada de decisão em relação ao plano de produção da fábrica, complementando o atual sistema de gestão que está a ser implementado e integrando conceitos teóricos e as práticas atuais. Desenvolver essa ferramenta seria um passo importante para a empresa, a fim de reduzir os tempos de desenvolvimento do plano de produção (processo manual demorado e sujeito a erro humano), maximizar a produção e reduzir o número de trocas de ferramenta.

O primeiro capítulo do projeto consiste na introdução e âmbito do trabalho, e é feita uma breve apresentação da Autoneum Setúbal e dos seus produtos. No segundo capítulo é abordado o planeamento de produção, os seus conceitos, problemas de escalonamento, estratégias de produção e problemas de dimensionamento de lotes. No terceiro capítulo são apresentados alguns conceitos básicos de programação matemática e seguidamente é exposta uma revisão bibliográfica sobre os modelos matemáticos para problemas de escalonamento e de dimensionamento de lotes. Com a revisão bibliográfica concluída, no quarto capítulo é apresentado o planeamento de produção na Autoneum Setúbal, começando com um estudo de caso representativo, seguindo com a definição do modelo, e finalizando com a resolução do Estudo de Caso. São apresentados os vários planos de produção e respetivos resultados. Por último, no sexto capítulo, faz-se a síntese do trabalho realizado, tiram-se conclusões e são apresentadas propostas de trabalho futuro.

Palavras-chave: Produção, planeamento, escalonamento, dimensionamento, programação matemática.

Abstract

The following project was developed under the Masters in Production Engineering at the Polytechnic Institute of Setúbal. The case study focuses on the automobile components industry, namely the Autoneum group, a Swiss multinational company operating in Portugal. At the Setúbal manufacturing facilities (Autoneum Setúbal), are produced acoustic parts (NVH) and thermal insulators (heatshields).

With the efficiency concept increasingly present in the industry, major investments are made in the areas Research and Development (R&D) of product and Information Technology (IT), with the aim of increasing profits and improving process efficiency. It is in this context that this project occurs.

The purpose of this work is the development of a tool that supports the management and administration of the company in the production planning stage, namely the decision-making process regarding the factory production plan, complementing the current management system that is being implemented, and integrating theoretical concepts and current practices. Developing this tool would be an important step for the company, in order to reduce the development time of the production plan (time consuming manual process and subject to human error), maximize production and reduce the number of tool changes.

The first chapter of this project is the introduction and scope of the work, and a brief presentation of Autoneum Setúbal and its products. The second chapter covers production planning, its concepts, scheduling problems, production strategies, and lot sizing problems. In the third chapter, some basic concepts of mathematical programming are presented, followed by a bibliographical review about the mathematical models for scheduling and lot sizing problems. With the bibliographic review completed, the fourth chapter presents the production planning at Autoneum Setúbal, starting with a representative case study, followed by the definition of the model, and ending with the Case Study resolution. The various production plans and their respective results are presented. Lastly, in the sixth chapter, we have a summary of the work done, conclusions are taken and future proposals are presented.

Keywords: Production, planning, scheduling, sizing, mathematical programming.

Índice

Agradecimentos	iv
Resumo	v
Abstract	vi
Índice	viii
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xi
Lista de Gráficos	xii
Lista de Siglas e Acrónimos	xiii
Capítulo 1 Introdução	1
1.1. Âmbito do Trabalho	1
1.2. Apresentação da Empresa	2
<i>1.2.1. Produtos</i>	<i>5</i>
Capítulo 2 Planeamento de Produção	7
2.1. Escalonamento	8
2.2. Estratégias e Sistemas de Produção	12
2.3. Dimensionamento de Lotes	15
Capítulo 3 Modelos Matemáticos na Literatura	19
3.1. Programação Matemática	20
3.2. Revisão Bibliográfica	21
Capítulo 4 O Planeamento de Produção na Autoneum Setúbal	28
4.1. Estudo de Caso	30
4.2. Definição do Modelo	39
<i>4.2.1. Conjuntos</i>	<i>40</i>
<i>4.2.2. Parâmetros</i>	<i>40</i>
<i>4.2.3. Variáveis</i>	<i>41</i>
<i>4.2.4. Funções Objetivo</i>	<i>41</i>
<i>4.2.5. Restrições</i>	<i>43</i>
4.3. Resolução do Estudo de Caso	45
4.4. Comparação de Resultados: Plano Autoneum vs Plano Modelo PLIM	59
Capítulo 5 Conclusões	65
5.1. Síntese do Trabalho Realizado	65

5.2. Conclusões e Propostas de Trabalho Futuro	66
Bibliografia	68
Anexo 1	72
Plano MFO1	72
Anexo 2	73
Plano MFO2	73
Anexo 3	74
Plano MFO3	74
Anexo 4	75
Plano MFO4	75
Anexo 5	76
Plano MFO5	76
Anexo 6	77
Plano MFO6	77
Anexo 7	78
Plano Autoneum.....	78

Lista de Figuras

Figura 1 – Logo Autoneum.....	2
Figura 2 - Marcos históricos da empresa (adaptado de Autoneum, 2018).	3
Figura 3 - Autoneum em números, ano 2017 (Autoneum, 2018)	4
Figura 4 - Prioridades Estratégicas (Autoneum, 2018)	4
Figura 5 - Instalações Autoneum Setúbal, Lda.	5
Figura 6 - Estrutura <i>underbody</i> e um exemplo de aplicação (Autoneum, 2018).....	6
Figura 7 - Exemplo de aplicação e de um <i>heatshield</i> (Autoneum, 2018) ...	6
Figura 8 - Horizonte de Planeamento (adaptado de Pinto, 2010)	7
Figura 9 - Representação das estruturas <i>Flow Shop</i> e <i>Job Shop</i>	11
Figura 10 - Push System vs Pull System	14
Figura 11 - Metodologia de resolução de um problema	19
Figura 12 - Fluxo de informação no planeamento de produção Autoneum Setúbal.....	29
Figura 13 - Cenário real de um plano provisório de produção	33
Figura 14 - Necessidade de operadores num cenário real de um plano provisório de produção.....	34
Figura 15 - Alterações de produções provocadas pela falta de capacidade de máquina	35
Figura 16 - Verificação das necessidades de operadores após alterações anteriores	36
Figura 17 - Alterações de produções provocadas pela falta de capacidade de operadores.....	37
Figura 18 - Cenário real do plano final de produção	38
Figura 19 - Parte do plano gerado pelo modelo MFO1	48
Figura 20 - Parte do plano gerado pelo modelo MFO2	50
Figura 21 - Parte do plano gerado pelo modelo MFO3	52
Figura 22 - Parte do plano gerado pelo modelo MFO4	54
Figura 23 - Parte do plano gerado pelo modelo MFO5	56
Figura 24 - Parte do plano gerado pelo modelo MFO6	58

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Características de Planeamento estrutural (adaptado de Assis, 2018).....	9
Tabela 2 - Dados BOM referentes aos produtos a escalonar	31
Tabela 3 - Plano de pedidos do cliente	32
Tabela 4 - Resultados do Plano Autoneum.....	46
Tabela 5 - Resultados do plano MFO1	47
Tabela 6 - Resultado do plano MFO2	49
Tabela 7 - Resultados do plano MFO3	51
Tabela 8 - Resultados do plano MFO4	53
Tabela 9 - Resultados do plano MFO5	55
Tabela 10 - Resultados do plano MFO6	57
Tabela 11 - Resultados dos planos.....	59

Lista de Gráficos

Gráfico 1 – Número de trocas de ferramentas em 2019 na Autoneum Setúbal.....	45
Gráfico 2 – Total da produção.....	59
Gráfico 3 - Total de produtos não produzidos por troca de ferramentas ..	60
Gráfico 4 – Total de número de operários.....	61
Gráfico 5 - Total de trocas de ferramenta	62
Gráfico 6 - Total da produção – Total de produtos não produzidos por troca de ferramentas	62
Gráfico 7 - Total de tempo de processamento (horas).....	63
Gráfico 8 - Total de resolução do modelo (segundos)	64

Lista de Siglas e Acrônimos

BOM	<i>Bill of Materials</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
FIFO	<i>First in first out</i>
FJS	<i>Flexible Job Shop</i>
FJS-SDST	<i>Flexible Job-shop com Tempos de Setup Dependentes da Sequência</i>
FO	Função Objetivo
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
I&D	Investigação e Desenvolvimento
IO	Investigação Operacional
JIT	<i>Just in Time</i>
MP	Matéria-Prima
MPS	<i>Master Production Schedule</i>
MTO	<i>Make-to-Order</i>
MTS	<i>Make-to-Stock</i>
PA	Produto Acabado
PC&L	<i>Production Controller & Logistic</i>
PL	Programação Linear
PLIM	Programação Linear Inteira Mista
PM	Programação Matemática
SA	<i>Simulated Annealing</i>
SAP	<i>System Application and Production</i>
TI	Tecnologias de Informação

TS

Tabu Search

Capítulo 1 Introdução

1.1. Âmbito do Trabalho

A crescente competitividade e globalização que o mundo está a encarar atualmente têm um enorme efeito sobre as empresas e os seus mercados. Essa realidade produz mudanças mais rápidas no equilíbrio entre a oferta e a procura, levando a preços instáveis, tanto para o produto final como para as matérias-primas. Tendo isto em conta, as empresas estão a otimizar os seus processos internos de modo a torná-los mais eficientes, reduzindo assim os seus custos operacionais e, conseqüentemente, melhorando os resultados financeiros.

Por outro lado, o desenvolvimento de novas tecnologias e soluções de Tecnologias de Informação (TI), que permitam às empresas controlar e acompanhar melhor as operações nas suas fábricas, tornou possível para as empresas alcançar os níveis de eficiência pretendidos e reduzir o desperdício. Portanto, as empresas estão a investir muito tempo e dinheiro em Investigação e Desenvolvimento (I&D), em particular no desenvolvimento de TI, para gerir e planejar cada operação, desde a encomenda das matérias-primas até à entrega do produto final. Como consequência, resultam modelos novos, melhores e mais complexos, que podem integrar etapas de produção, logística de armazém e distribuição de produtos.

Esta necessidade de otimizar os processos internos através do desenvolvimento de novas tecnologias e soluções de TI está bem presente na indústria de componentes de automóvel, dado ser um mercado saturado e com enormes níveis de competitividade, onde os preços finais do produto aplicados ao cliente são um fator-chave para medir o sucesso das empresas. Este também é um mercado caracterizado por baixas margens de lucro unitárias, onde o grande volume dita os resultados. A Autoneum é uma empresa que opera neste mercado e está ciente dos novos conceitos e tecnologias que podem melhorar e aperfeiçoar suas capacidades. A Autoneum tem investido muito no desenvolvimento de novas ferramentas que capacitam as suas fábricas com novas e melhores metodologias e práticas de controle e planeamento. O melhor exemplo é o sistema integrado de gestão *System Application and Production – Enterprise Resource Planning* (SAP-ERP) que a empresa está a implementar atualmente nas instalações fabris de Setúbal (Autoneum Setúbal).

Neste trabalho vai ser abordado o tema do planeamento de produção ao nível operacional e modelos matemáticos utilizados, com ênfase na programação linear inteira mista (PLIM) como caminho a seguir na resolução deste tipo de problemas combinatórios.

O objetivo final será o desenvolvimento de uma ferramenta que auxilie a gestão e administração na etapa de planeamento da produção, nomeadamente a tomada de decisão em relação ao plano de produção da fábrica, complementando o atual sistema de gestão que está a ser implementado e integrando conceitos teóricos e as práticas atuais. Desenvolver essa ferramenta seria um passo importante para a empresa, a fim de reduzir os tempos de desenvolvimento do plano de produção (processo manual demorado e sujeito a erro humano), maximizar a produção e reduzir o número de trocas de ferramenta.

Neste capítulo introduziu-se e expôs-se o âmbito do trabalho e, de seguida, far-se-á uma breve apresentação da Autoneum Setúbal e dos seus produtos. No segundo capítulo será abordado o planeamento de produção, os seus conceitos, problemas de escalonamento, estratégias de produção e problemas de dimensionamento de lotes. No terceiro capítulo serão apresentados alguns conceitos básicos de programação matemática e seguidamente será exposta uma revisão bibliográfica sobre os modelos matemáticos para problemas de escalonamento e de dimensionamento de lotes. Com a revisão bibliográfica concluída, no quarto capítulo será apresentado o planeamento de produção na Autoneum Setúbal, começando com um estudo de caso representativo, seguindo com a definição do modelo, e finalizando com a resolução do Estudo de Caso. Serão apresentados os vários planos de produção e respetivos resultados obtidos. Por último, no quinto capítulo, far-se-á a síntese do trabalho realizado, tirar-se-ão conclusões e serão apresentadas propostas de trabalho futuro.

1.2. Apresentação da Empresa

A Autoneum (Figura 1) é uma empresa multinacional, com sede em Winterthur, Suíça, que desenvolve e produz componentes e sistemas leves, e multifuncionais para proteção contra ruído e calor para quase todos os fabricantes de automóveis em todo o mundo.



Figura 1 – Logo Autoneum

Na Figura 2 é apresentada a evolução histórica da empresa, antes da sua fundação em 2011.

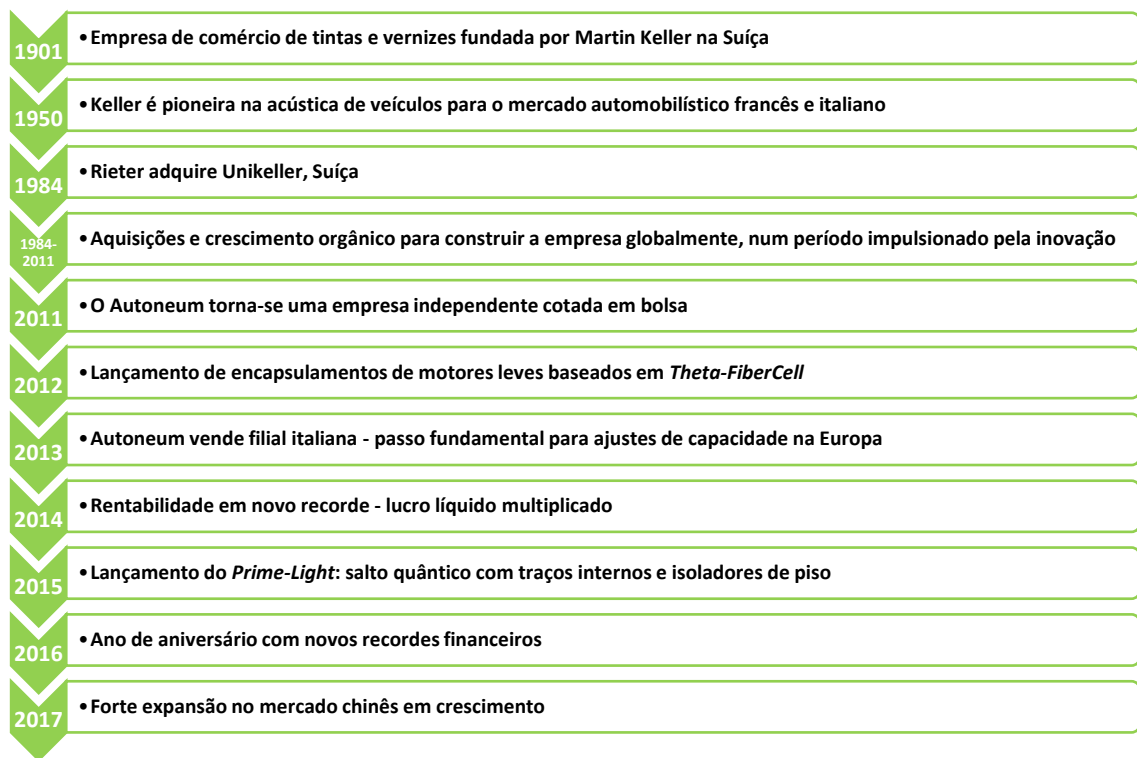


Figura 2 - Marcos históricos da empresa (adaptado de Autoneum, 2018)

Destaque-se o ano de 1984 em que a fábrica de máquinas Rieter adquiriu a Unikeller, um fabricante de controle de ruído e sistemas de isolamento térmico para veículos, dando assim o primeiro passo para a constituição da Autoneum. A política de aquisições continuou de modo a se tornar uma empresa global, tendo adquirido várias empresas em vários países, em particular, a Sipavel em Setúbal, em 1988. A Autoneum foi fundada em 2011 como uma *spin-off* da Rieter Holding, tornando-se uma empresa independente cotada em bolsa.

Na Figura 3 são apresentados alguns números da empresa relativos ao ano 2017. As instalações de produção estão localizadas nas imediações dos principais clientes, quer seja na Europa, Ásia, América do Norte ou América do Sul.



Figura 3 - Autoneum em números, ano 2017 (Autoneum, 2018)

A fim de expandir ainda mais o mercado existente e a liderança tecnológica em soluções de gestão acústica e térmica, a Autoneum implementa consistentemente as prioridades estratégicas (Figura 4) estabelecidas na estratégia corporativa. A cultura de alto desempenho promovida e praticada na Autoneum serve aqui como base para a implementação efetiva e o sucesso corporativo de longo prazo.

Das prioridades estratégicas em que existe a cultura de alto desempenho, destaca-se a prática operacional de excelência.



Figura 4 - Prioridades Estratégicas (Autoneum, 2018)

Vivendo uma cultura de alto desempenho e uma estratégia corporativa voltada apenas para o progresso económico, não se consegue alcançar um sucesso sustentado. Uma cultura corporativa motivadora, direcionada não apenas para o desempenho, mas também para a coesão e a satisfação

dos funcionários, é um fator essencial que contribui tanto para o sucesso tangível, quanto para o intangível de uma empresa.

A Autoneum definiu, portanto, valores e comportamentos corporativos específicos, que formam os pilares fundamentais de uma cultura de alto desempenho. Essa cultura da Autoneum foi desenvolvida por uma equipe de gestão global em todos os locais e divisões.

Os funcionários da Autoneum vivem esses valores por meio de suas decisões e ações. Isso permite que a Autoneum permaneça fiel aos seus princípios a longo prazo.

1.2.1. Produtos

A fábrica da Autoneum Setúbal (Figura 5) produz componentes e acessórios para veículos automóveis, nomeadamente os sistemas *underbody* e *heatshields* (acústicos e isolantes térmicos).



Figura 5 - Instalações Autoneum Setúbal, Lda.

ESTRUTURA UNDERBODY

Um *underbody* (Figura 6) é uma estrutura que é acoplada na parte inferior do veículo e que aumenta a sua aerodinâmica ao afetar o arrastamento e o levantamento, ou seja, resulta num menor consumo de combustível e respetiva redução das emissões do veículo. Os *underbody* baseados em têxteis e consequentemente leves da Autoneum também absorvem ruído e, portanto, reduzem simultaneamente o ruído interior e exterior (ruído de passagem) dos carros.



Figura 6 - Estrutura *underbody* e um exemplo de aplicação (Autoneum, 2018)

ESTRUTURAS HEATSHIELDS

Heatshields (Figura 7) são estruturas em alumínio e são usadas principalmente em veículos para proteger o calor radiante que surge do compartimento do motor e do sistema de escape. Para isso, a parte inferior do motor, a parede frontal entre o compartimento do motor, o compartimento de passageiros e o sistema de escape estão equipados com esses painéis de proteção em alumínio. Os *heatshields* da Autoneum podem ter uma perfuração especial e serem embossados. Esta micro perfuração e relevo facilita a absorção de ruído e, conseqüentemente, uma redução adicional do ruído interior e exterior dos veículos.

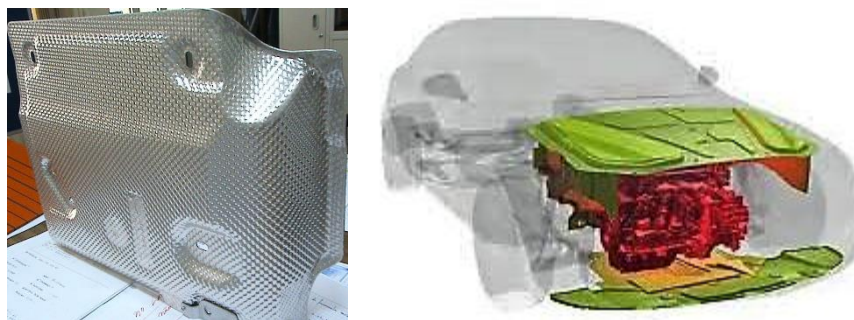


Figura 7 - Exemplo de aplicação e de um *heatshield* (Autoneum, 2018)

Capítulo 2 Planeamento de Produção

De um modo geral, pode definir-se o planeamento de produção como o processo pelo qual a organização define um rumo a seguir, traça planos e define as orientações que lhe permitem, tendo em consideração as limitações atuais e previstas para o futuro, atingir os objetivos previamente definidos.

Segundo Chase *et al.* (2006), Courtois *et al.* (2003) e Santos & Barbosa (2007), pode-se dividir o planeamento em três tipos (Figura 8):



Figura 8 - Horizonte de Planeamento (adaptado de Pinto, 2010)

- O Planeamento Estratégico de Produção assume como principais objetivos: maximizar os resultados das operações e também diminuir o risco inerente à tomada de decisões. Sendo considerado de longo prazo, o Planeamento Estratégico de Produção encara a matriz da organização – missão – como mote para preparar o futuro. Com efeito, este planeamento reside no estabelecimento de objetivos e políticas apropriadas aos recursos da organização que se transformam em resultados operacionais eficientes, permitindo adquirir vantagens competitivas (Santos & Barbosa, 2007);

- O Planeamento Agregado ou Tático de Produção está associado à estratégia de planeamento a médio prazo, onde se procura o dimensionamento dos recursos produtivos existentes para satisfazer os níveis de procura de um produto num determinado período temporal (Stevenson, 2005). Habitualmente este período temporal é de 6 a 12 meses e envolve a criação de um plano capaz de responder a esta previsão através da combinação dos recursos da organização e os seus níveis de produção. Este modelo de planeamento permite ainda que os custos inerentes ao excesso ou escassez de capacidade sejam previstos e diminuídos. São tomadas as decisões relativas a capacidades e onde são definidas as políticas para cada família de produtos produzidos pela organização. Este Planeamento é chamado de Agregado uma vez que o seu plano é elaborado para as diferentes famílias

de produtos (Courtois *et al.*, 2003).

- O Planeamento Mestre ou Operacional de Produção resulta num mapa de programação de curto prazo, com as necessidades internas e externas que devem ser consideradas pela produção, baseado nas encomendas e previsões de consumo e procura. O mapa mestre em questão inclui a programação, o planeamento das necessidades de materiais e as ordens de entrada. Com base em Stevenson (2005) este planeamento surge na sequência do Planeamento Agregado, dando origem ao plano de produção onde estão presentes as capacidades dos recursos e as necessidades dos materiais e das matérias-primas. As ordens de fabrico, após serem tratadas no *Master Production Schedule* (MPS), que é responsável por gerar as quantidades e a data de produção de cada artigo, são então comparadas com a capacidade da fábrica (Chase *et al.*, 2006).

Muitos outros autores definem planeamento sem fazer uma divisão tão específica nos três tipos mencionados. No entanto, em geral, reconhece-se uma separação do conceito de planeamento a longo prazo dos outros dois, médio e curto prazo. Por exemplo, segundo Vollmann *et al.* (1997), o planeamento e controlo de produção é responsável por planear e controlar todos os fatores inerentes à produção, tais como, o planeamento de necessidades de materiais e respetivo controlo dos fluxos de materiais, ou ainda o planeamento de capacidade produtiva e fluxos de recursos humanos. Para Russomano (1995), o planeamento e controlo da produção permite a coordenação de todas as atividades inerentes à produção de acordo com os planos da mesma, garantindo o cumprimento dos mesmos com a máxima economia e eficiência. Para Tersine (1985), um sistema de planeamento e controlo de produção deve não só facilitar o desenvolvimento de bons planos, mas também garantir que estes sejam implementados e se corrijam à medida que é necessário. Assim sendo, os processos de planeamento e controlo usados no processo produtivo são adotados pelas empresas, consoante a sua tipologia de produção.

O planeamento de produção fornece informação sobre as necessidades de produtos, respetivos prazos de entrega a cumprir, níveis de *stock* de matérias-primas e capacidade produtiva existente. No entanto, não toma decisões nem efetua a gestão das operações, sendo que a tomada de decisão tem de ser realizada pelos gestores, ou seja, o sistema de planeamento apenas fornece informações que servem de suporte para os gestores realizarem a tomada de decisão mais correta (Vollmann *et al.*, 2005).

2.1. Escalonamento

Pinedo (2012) definiu escalonamento (*scheduling*) como uma forma de um processo de tomada de decisão em que um conjunto de atividades é alocado a recursos limitados num certo período de tempo. Para Marques (2018) escalonamento diz-nos quem faz, o quê, onde e quando. Trata-se de alocar os recursos (máquinas, unidades de processamento, tripulação, e/ou outros, dependendo do sistema em que se encontram) a tarefas (operações realizadas através da utilização dos recursos), num dado período de tempo, com a finalidade de otimizar um ou mais objetivos. Os objetivos podem assumir diferentes formas, como, por exemplo, minimizar os tempos e custos de produção, maximizar o lucro e a utilização da capacidade, tendo em consideração o nivelamento da produção, de modo a

conseguir trazer estabilidade para o processo de produção e também para uma melhor gestão dos recursos humanos fabris.

Já Le Pape (2005) afirma que dado um conjunto de recursos com capacidades conhecidas, um conjunto de atividades com tempos de processamento e necessidades de recursos também conhecidas, e um conjunto de restrições temporais entre as atividades, um problema de escalonamento “puro” consiste em decidir quando executar cada atividade, tendo em conta a satisfação das restrições de tempo e de recursos.

De seguida, tem-se a Tabela 1 (adaptada de Assis, 2018) com algumas características do planeamento e escalonamento presentes num ambiente fabril complexo:

Tabela 1 - Características de Planeamento estrutural (adaptado de Assis, 2018)

Estratégia	Inputs	Variáveis de decisão	Outputs	Objetivos
Curto Prazo	Plano de médio prazo; Carteira de encomendas; Prazos de entrega;	Recursos Existentes: Nível de Produção; Sequência de trabalho;	Programas distribuindo o trabalho por secções, turnos, operadores e equipamentos;	Assegurar a satisfação das encomendas dentro dos prazos estabelecidos; Maximizar o rendimento dos meios de produção;
Médio Prazo	Planos de longo prazo; Limites da capacidade atual; Previsões anuais de vendas; Viabilidade de alternativas de produção e de custos;	Intensidade do uso dos recursos existentes: - Níveis de produção - Níveis de stock - Níveis de subcontratos	Planos de produção especificando como satisfazer a procura com os recursos existentes.	Assegurar a utilização mais eficiente da capacidade de produção existente.
Longo Prazo	Objetivos gerais; Previsões gerais; Capital disponível; Concorrência;	Localização de Recursos: - Produtos - Mercados - Processos	Planos para aumento/diminuição de capacidades; Planos para novos produtos; Novas tecnologias; Novos mercados; Novas fábricas e deslocalização;	Definição das políticas de investimentos e evolução da organização em termos de objetivos a atingir.

Para simplificar o processo de escalonamento, várias estruturas produtivas são definidas e classificadas. Essa padronização ajuda a identificar qual o processo que se enquadra melhor no processo de produção da Autoneum Setúbal, quais os modelos de escalonamento que existem na literatura e quais podem ser estudados em maior detalhe.

Destas estruturas produtivas são destacadas de seguida as mais usuais, como a *Flow Shop*, a *Job Shop* e algumas das suas variantes. Uma *Flow Shop* é uma estrutura produtiva onde m máquinas são dispostas em sequência e todas as n tarefas são processadas por uma sequência de máquinas individuais, ou seja, todos os trabalhos seguem a mesma direção, apesar de terem caminhos de produção diferentes. Alguns gargalos vão surgindo devido aos tempos de processamento das diferentes máquinas e, neste caso, os trabalhos ficam a aguardar para serem processados. Estes pontos de estrangulamento irão operar seguindo o método FIFO (*first in first out*).

A *Flexible Flow Shop* é uma adaptação da *Flow Shop* e tem apenas uma diferença. Em vez de ter máquinas individuais sequenciais, a estrutura possui n estágios, cada um com m máquinas idênticas paralelas. Cada trabalho agora tem de ir lançar as etapas do seu caminho de produção e em cada

estágio será processado por uma das máquinas disponíveis.

Ma'ruf (2007) define as principais características deste tipo de estrutura *Flow Shop*:

- Elevada padronização (*standardization*) e rapidez;
- Manuseamento reduzido dos materiais (*material handling*);
- Fluxos com períodos curtos;
- Custos de processamento unitários reduzidos;
- Custos elevados de investimento e necessidades de produção em massa;
- Equipamentos especializados e trabalhadores pouco habilitados;
- Pouca flexibilidade.

A *Job shop* é uma estrutura onde m máquinas processam n tarefas. No entanto, cada trabalho tem o seu próprio caminho produtivo que é independente da sequência da máquina, ou seja, cada trabalho tem sua própria sequência de máquina predefinida e os trabalhos podem seguir direções diferentes.

A *Flexible Job Shop* (FJS) é uma adaptação da *Job Shop* e, tal como a anterior estrutura flexível apresentada, tem fases de m máquinas paralelas idênticas.

Ma'ruf (2007) define também neste caso as principais características da estrutura *Job Shop*:

- Grande variedade de produtos customizados;
- Recursos flexíveis;
- Recursos humanos especializados;
- Fluxos "misturados";
- Manuseamento elevado dos materiais;
- Inventários elevados;
- Tempos de fluxos elevados;
- Sistemas de informação altamente estruturados;
- Elevados custos por unidade de produto, mas o investimento é reduzido.

A Figura 9 apresenta exemplos de estruturas *Flow Shop* (produção repetitiva com o layout por produto) e *Job Shop* (produção repetitiva com o layout por processo) e a diferença entre elas é facilmente reconhecível, já que no primeiro caso, todos os produtos têm a mesma direção e no segundo caso, o produto três (P3) tem uma direção diferente dos outros dois produtos (P1 e P2).



Figura 9 - Representação das estruturas *Flow Shop* e *Job Shop*

A estrutura produtiva na fábrica Autoneum é uma FJS, pois compreende apenas uma etapa de processamento com várias máquinas em paralelo. Além disso, os produtos tomam caminhos diferentes e nem todas as máquinas podem produzir todos os produtos. Na verdade, cada máquina é alocada para um conjunto específico de produtos, dependendo do seu formato e das suas especificidades. Das características apresentadas por Ma'ruf (2007), as que mais se evidenciam na fábrica são, a grande variedade de produtos customizados, recursos flexíveis e elevado manuseamento dos materiais.

Em geral, os processos industriais exigem trocas de produção em algum momento. Essas mudanças na produção originam quebras de produção que, dependendo da duração, podem ter efeitos significativos na produtividade das fábricas e conseqüentemente originam custos, chamados custos de *setup*. Quando estes custos correspondem ao tempo necessário para preparar uma máquina para a execução de uma determinada tarefa, então são chamados de tempos de *setup*. Os tempos de *setup* podem ser causados por trocas de produção, manutenção da máquina, processos de limpeza ou outras atividades que causam atrasos na máquina.

Para Allahverdi *et al.* (2008) existem dois tipos de tempos de *setup*:

- Dependentes da seqüência, quando os tempos dependem da tarefa a ser executada e da tarefa imediatamente precedente;
- Independentes da seqüência, quando os tempos dependem apenas da tarefa a ser executada;

e podem ser considerados de duas maneiras diferentes:

1. Insignificantes, se o tempo de *setup* não for levado em consideração;
2. Incorporado como parte do tempo de processamento desse trabalho.

O processo de produção na empresa assemelha-se muito com uma estrutura *Flexible Job Shop* com tempos de *setup* dependentes da seqüência (FJS-SDST). Existem três tipos de operações que

exigem tempos de *setup*: troca de molde, troca de carimbo e trocas de guias, em que, obviamente, a mudança de molde é a mais longa. Estas operações acontecem sempre que há troca de produção numa máquina.

2.2. Estratégias e Sistemas de Produção

Geralmente, a indústria de componentes de automóveis opera com grandes níveis de procura do cliente sob incerteza. Refira-se relativamente a incerteza que um sistema real envolve vários fatores que, devido à sua natureza, são extremamente difíceis de prever. Davenport & Beck (2000) enumeram algumas fontes de incerteza quando se trata de um escalonamento de uma fábrica:

- Avarias nas máquinas;
- Problemas com operadores/*staff*;
- Chegada de novos pedidos inesperados;
- Cancelamento ou modificação de pedidos em curso;
- Matérias-primas disponíveis antes ou depois do tempo;
- Incerteza em relação aos tempos de processamento.

Existem ainda vários outros fatores que podem modificar o escalonamento previamente feito num sistema real, e que devido às suas características fazem com que tenham de ser tratados à medida que vão surgindo.

Para superar o problema da incerteza na procura, poderia ser aplicada uma estratégia *Make-to-Stock* (MTS), o que significaria que a produção da fábrica seria programada para atender a determinados níveis de *stock* e não a pedidos específicos. Na estratégia MTS, as empresas, fazem as suas previsões de venda e produzem os artigos padronizados, mantendo-os em *stock*. Pires (2004) defende que, nesse caso, a interferência dos clientes no ciclo produtivo é inexistente, salvo em momentos de pesquisas de mercado. O uso desta estratégia pode induzir uma pressão alta no responsável de armazém, que tem a responsabilidade de manter o nível de *stock* mais eficiente, a fim de não permitir ruturas de *stock* e de manter baixos custos de armazenagem.

Com o objetivo de evitar os problemas associados à existência de *stock*, uma estratégia alternativa à MTS foi explorada, a estratégia *Make-to-Order* (MTO). Esta é uma estratégia de produção em que a produção é programada com base quase apenas nas ordens de encomenda recebidas e quase que não incorpora os níveis de *stock* do produto acabado. Essa estratégia operacional exige tempos de espera mais longos, pois o grosso da produção só é iniciada quando os pedidos são recebidos (Pires, 2004). Isso significa que a fábrica opera com um plano mais apertado, pois na realidade a fábrica não tem *stock* ou tem um *stock* mínimo, e cada ordem de produção corresponde à ordem real solicitada. Saliente-se que uma ordem de encomenda na estratégia MTO não tem de ser necessariamente de um cliente, mas pode corresponder a uma fase intermédia em que o responsável de armazém programa alguma produção para *stock*. Para operar sob essa estratégia, é necessária

uma maior eficiência operacional para produzir volumes maiores de pedidos, no mesmo período.

A vantagem da estratégia MTO é a exclusão quase total de *stocks* que resulta em menores custos de armazenamento para a empresa. No entanto, esta estratégia tem duas grandes desvantagens: o risco de falha na satisfação dos pedidos, devido a picos de procura não planeados, e os maiores tempos de *setup* de produção. Por exemplo, se uma máquina produz três ordens de encomenda em sequência, que compreendem os seguintes produtos:

1. Encomenda 1 → Produto 1
2. Encomenda 2 → Produto 2
3. Encomenda 3 → Produto 1,

então a máquina produzirá o produto 1, seguido pelo produto 2 e novamente pelo produto 1, resultando em tempos de *setup* desnecessários entre os pedidos.

No entanto, a estratégia MTO integrada numa filosofia de gestão *Just in Time* (JIT) permite colmatar um pouco as desvantagens da estratégia. O sistema JIT é um sistema de gestão da produção que determina que tudo deve ser produzido, transportado ou comprado no momento certo com o objetivo de reduzir tempos de *stock* e, conseqüentemente, custos. Com este sistema pretende-se ter em conta não só as quantidades em *stock*, mas também o tempo de permanência, quer do produto acabado quer da matéria-prima. A matéria-prima chega ao local de produção somente no momento exato em que vai ser necessária e o produto final somente é fabricado a tempo de ser vendido. Nas fábricas onde o sistema está implementado, o *stock* de matérias-primas é mínimo e suficiente para baixos níveis de produção. Para que tal seja possível, os fornecedores devem estar em sintonia com a empresa que opera para que possam fazer entregas de pequenos lotes na frequência necessária.

Segundo Cheng & Podolsky (1996), a estratégia JIT é uma filosofia de gestão adotada pelas empresas, com o objetivo de estas alcançarem vantagens competitivas sustentáveis com base em níveis de desempenho elevados, qualidade dos produtos e do serviço prestado ao cliente. As organizações que adotam este tipo de filosofia revelam uma constante preocupação com a redução de todo o tipo de desperdícios, com o aumento da eficiência produtiva e com a melhoria da qualidade dos seus produtos.

Os fabricantes de automóveis são um exemplo do tipo de organização que funciona no sistema JIT. As fábricas atuais são construídas em parques industriais, onde os fornecedores de componentes estão instalados nas redondezas, geralmente no próprio parque, e fazem entregas de pequenos lotes na mesma frequência da produção automóvel, criando um fluxo quase contínuo.

O sistema JIT é considerado como uma abordagem de produção *Pull*. O sistema *Pull* consiste em produzir apenas aquilo que é necessário quando for necessário, limitando explicitamente a quantidade de trabalho em curso. Visa evitar *stocks* de produtos mediante a produção e fornecimento daquilo que o cliente deseja quando o cliente precisar, nem mais cedo nem mais tarde, evitando trabalho desnecessário. As operações vão acontecendo das fases finais até às iniciais (Pinto, 2010). Para Paez et al. (2004), o sistema *Pull* não é um objetivo, mas um guia para a cadeia de valor, pois a motivação é

sincronizar a cadeia de valor com as necessidades do cliente. Segundo Thomaz (2015), para se aplicar o sistema *Pull*, basta que cada célula de trabalho puxe os materiais da célula anterior apenas perante um pedido da seguinte. As operações serão limitadamente realizadas segundo o conceito JIT, ou seja, no momento e nas quantidades necessárias.

O sistema *Push* é o sistema clássico de gestão da produção que se caracteriza pelo empurrar dos produtos da empresa para o cliente não havendo uma limitação, pelo menos direta, do trabalho em curso. Caracterizado por sistemas de planeamento e controlo muito rígidos e baseados em previsões e nada orientado para o mercado (Pinto, 2010). Para Barco e Villela (2008), os sistemas de produção do tipo *Push* são sistemas onde a produção é controlada por sistema de planeamento central, no qual se consideram previsões ou onde as etapas de produção são programadas.

Utilizar o sistema *Pull*, em vez de o tradicional sistema *Push*, procura diminuir a dependência em relação às previsões e orientar a gestão ao mercado (Pinto, 2010).

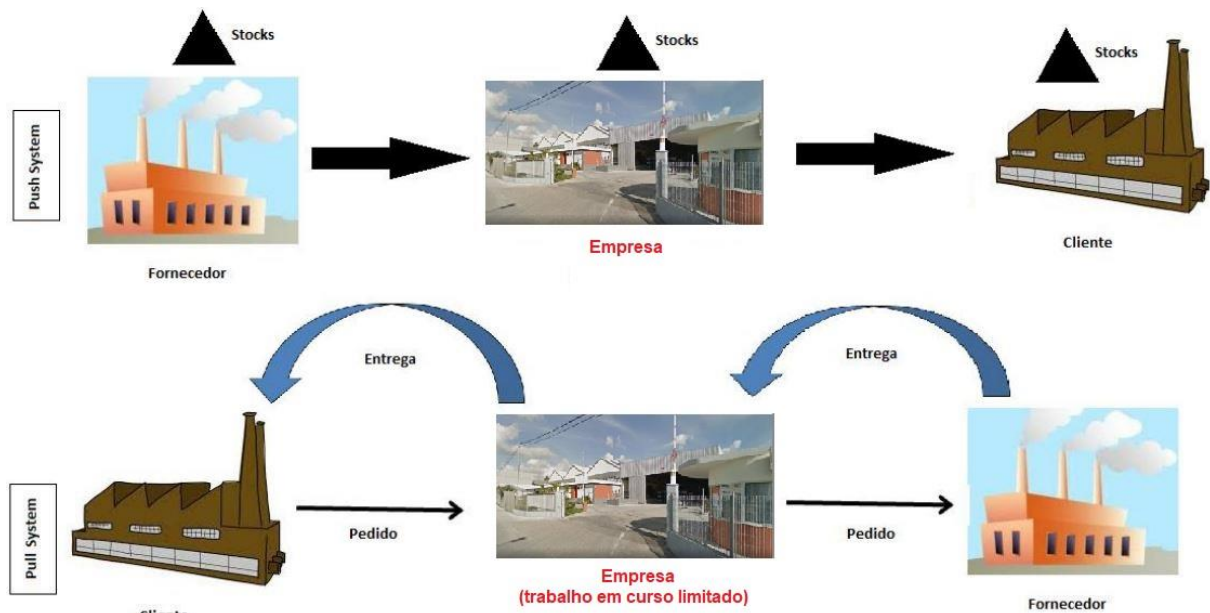


Figura 10 - Push System vs Pull System

Observando a Figura 10, podemos verificar que num sistema *Push*, a empresa vai requisitar as matérias-primas ao fornecedor, produzir as peças e enviar quando o cliente pedir. A eficiência vai ser a principal preocupação, uma vez que mantém todos os recursos ocupados. Desencadeia os processos, sem se preocupar com a procura exata do bem ou serviço (apenas com base em previsão), resultando num aumento de *stock*, custos e tempo. Contrariamente, no sistema *Pull*, o processo só se inicia após a encomenda do cliente, daí a produção só se basear na procura do momento.

Refira-se ainda sobre o Sistema *Pull* que existem três tipos de sistema: de Reabastecimento, Sequencial e Combinado (Smalley, 2004). O último é uma combinação dos dois primeiros. A diferença entre os sistemas de Reabastecimento e Sequencial, basicamente deve-se às limitações de trabalhos

diferentes para cada um, ou seja, aos níveis de *stock* permitidos, mantendo sempre a essência do sistema *Pull* de produzir apenas o necessário. No sistema *Pull* de Reabastecimento pretende-se satisfazer rapidamente as ordens de encomenda, repondo constantemente os produtos, nem que para tal o processo envolva alguma retenção de *stock*. O sistema *Pull* Sequencial entra em ação no preciso momento em que chega uma encomenda com a quantidade exata a ser produzida, havendo uma grande limitação na quantidade de trabalho em curso.

Sendo a Autoneum Setúbal um fornecedor de organizações que funcionam no sistema JIT, acaba também por funcionar neste sistema no que respeita a parte do seu produto acabado, fazendo obrigatoriamente entregas constantes de pequenos lotes na mesma frequência da produção automóvel. Pode dizer-se que é visivelmente patente um sistema *Pull* Combinado. O grosso da produção é produzido seguindo um sistema de Reabastecimento, onde existe a preocupação de criar algum *stock* para fazer face a eventuais picos de procura. Outra parte da produção, os produtos categorizados como *spare parts* (peças de reposição para substituir peças antigas ou danificadas) seguem um sistema Sequencial. Estas peças já não estão em produção no dia a dia, mas terão de ser garantidas durante alguns anos, dependendo de cada contrato.

2.3. Dimensionamento de Lotes

Desde a publicação do artigo de Harris (1913) que o problema de dimensionamento de lotes tem merecido muita atenção no meio académico e na prática. O problema consiste em determinar as quantidades a produzir, de um produto ou de diferentes tipos de produtos, ou seja, o dimensionamento dos lotes, ao longo de um horizonte temporal de modo a minimizar os custos, sendo conhecida a procura, o custo unitário de produção e de armazenagem, a capacidade de produção e os custos de *setup*. A atenção que o problema de dimensionamento de lotes tem recebido não é de estranhar dada a importância do tema gestão de *stocks* numa economia global.

Karimi *et al.* (2003) referem que uma decisão para o problema de dimensionamento de lotes consiste em identificar quando e quanto de um produto se deve produzir tal que os custos de *setup*, produção e armazenagem sejam minimizados. Relembre-se que um problema de escalonamento pretende-se responder a quem faz, o quê, onde e quando. Facilmente se percebe que ambos os problemas se complementam.

Conforme mencionado na Secção 2.2, existem vários fatores de incerteza que podem modificar o escalonamento previamente feito num sistema real e que devido às suas características fazem com que tenham de ser tratados à medida que vão surgindo. No problema de dimensionamento de produção existem outros fatores de incerteza que levam a que seja dada uma maior importância à variação dos pedidos de encomenda. Com o objetivo de determinar os lotes de produção no horizonte de planeamento, geralmente, esse horizonte é dividido em períodos e o problema parte da determinação da quantidade a produzir de cada produto em cada período.

Para Karimi *et al.* (2003), as seguintes características são geralmente usadas para classificar o problema de dimensionamento de lotes e decidir a sua complexidade:

- **Horizonte de Planeamento:** o horizonte de planeamento é definido como o intervalo de tempo no qual o plano mestre de produção se estende para o futuro. O horizonte de planeamento pode ser finito ou infinito; a procura finita é geralmente acompanhada por uma procura dinâmica, enquanto a do infinito é acompanhada por uma estática. Além disso, o sistema pode ser observado continuamente ou em momentos distintos, que o classificam como um sistema contínuo ou do tipo discreto.
- **Número de estágios:** os sistemas de produção podem ser classificados como um sistema de estágio único ou multiestágio. Os sistemas de estágio único podem ser definidos como a produção do item final diretamente das matérias-primas ou das peças adquiridas por meio de uma única operação. Por outras palavras, não há montagens intermediárias no processo de transformação da matéria-prima no produto acabado. Para sistemas de estágio único, a procura de produtos é avaliada diretamente a partir de pedidos de clientes ou previsões de mercado. Em sistemas multiestágio, há uma relação pai-filho entre os itens. As matérias-primas são sequencialmente processadas, usando várias operações, até obter um produto final. A saída de uma operação (estágio) é a entrada para outra. Portanto, a procura em um estágio depende da procura dos seus pais no respetivo estágio. Esse tipo de procura é chamado de procura dependente. Problemas de vários estágios são mais difíceis de resolver do que problemas de estágio único.
- **Número de produtos:** os sistemas de produção podem ser classificados com base no número de itens finais ou produtos acabados. Nos problemas de dimensionamento de lote de um único item, há apenas um item final para o qual a atividade de planeamento deve ser executada, enquanto nos problemas de dimensionamento de lotes de vários itens, multi-item, existem vários itens finais. A complexidade dos problemas com vários itens é muito maior do que a dos problemas com um único item.
- **Capacidades ou restrição de recursos:** recursos ou capacidades num sistema de produção incluem mão-de-obra, equipamentos, máquinas, orçamento, espaço, etc. Quando não há limitação de recursos, o problema é declarado sem restrições de capacidade. Caso contrário o problema é denominado com restrições de capacidade. As restrições de capacidade são importantes e afetam diretamente a complexidade do problema.
- **Procura:** a procura pode ser classificada como determinística ou probabilística. Se o valor da procura é conhecido antecipadamente, é denominado determinístico, mas, se não se sabe exatamente com certeza e os valores se baseiam em algumas probabilidades, é probabilístico. A procura determinística pode ser ainda diferenciada como estática (a taxa de procura não muda ao longo do tempo) ou dinâmica (a taxa de procura muda ao longo do tempo). A procura probabilística também pode ser classificada como estacionária (a função de distribuição de probabilidade permanece inalterada ao longo do tempo) ou não estacionária (a função de distribuição de probabilidade varia com o tempo). Além disso, outra classificação importante da procura é a procura dependente e a procura independente. Em casos de procura independentes, os requisitos de um item não dependem de decisões sobre o tamanho do lote

de outro item. Esse tipo de procura pode ser visto em sistemas de produção de estágio único. No dimensionamento de lotes em vários estágios, onde existe um relacionamento pai-filho entre os itens, como a procura em um estágio depende da de seus pais (estágio anterior) é chamada de dependente. Problemas com procuras dinâmicas e dependentes são muito mais complexos do que problemas com procuras estáticas e independentes. Além disso, problemas com procura probabilística são mais complexos do que aqueles com procura determinística.

- Estrutura de *setup*: a estrutura de *setup* é outra característica importante que afeta diretamente a complexidade do problema. Tal como já referido, a troca de produção entre diferentes produtos pode resultar num custo e tempo de *setup*. Existem dois tipos de estrutura de *setup*: simples e complexa. Se o custo e tempo de *setup* num período forem independentes da sequência e das decisões de períodos anteriores então está-se perante uma estrutura de *setup* simples, caso contrário, está-se perante uma estrutura de *setup* complexa. Três tipos de estrutura de *setup* complexa podem ser descritos. Primeiro, se for possível continuar a execução da produção do período anterior para o período atual sem a necessidade de um *setup* adicional, reduzindo assim o custo e o tempo de *setup*, diz-se que há transferência de *setup*. Também se pode definir um segundo tipo de *setup* complexo, causado por semelhanças no design e no processo de produção de um grupo de itens. Quando a troca de produção ocorre entre itens da mesma família dá-se um custo de *setup* secundário. Por fim, o terceiro tipo de estrutura complexa corresponde ao caso em que há troca de produção de produtos diferentes com o correspondente custo e tempo de *setup* dependente da sequência. É óbvio que problemas com estruturas complexas de *setup* são mais difíceis de resolver.
- Escassez de *stock*: a falta de *stock* é outra característica que afeta a complexidade da resolução dos problemas de dimensionamento de lotes. Se a escassez for permitida, significa que é possível atender à procura do período atual em períodos futuros (pedidos pendentes) ou pode ser permitido que a procura não seja atendida de todo (vendas perdidas). A combinação de pedidos pendentes e vendas perdidas também é possível.

A produção na empresa Autoneum Setúbal tem um sistema de produção orientado por lotes, de estágio único e multi-item, pois os diversos produtos são produzidos em embalagens de várias unidades de produto através de uma única operação. Essas embalagens têm um tempo de processamento fixo específico, dependendo da máquina e do tipo de produto. A programação desse tipo de processo é mais fácil, pois os tempos e quantidades de processamento são fixos e o processo de planeamento torna-se um processo de reorganização na sequência de alocação e produção em cada máquina em relação aos vencimentos de cada lote. A melhor representação de tempo para este processo é uma representação de tempo discreto, uma vez que os tempos de processamento são fixos e, em seguida, a melhor duração do intervalo de tempo pode ser facilmente estimada.

Tal como já referido, a produção na empresa lida com uma estrutura de *setup* do tipo complexa, com tempos de *setup* dependentes da sequência. As operações que exigem tempos de *setup* são a troca de molde, troca de carimbo e troca de guias.

Refira-se ainda que a empresa faz um planeamento estratégico e agregado exigente da produção,

levando a planos de produção, numa primeira fase, anuais, com base numa procura determinística, dinâmica e independente. Este planeamento leva também a que não haja limitações de muitos recursos, em particular de matéria-prima. No entanto, existem outros recursos que são inevitavelmente limitados, tais como a mão-de-obra e as máquinas, restringindo a capacidade de produção. Existe uma grande exigência no que diz respeito à escassez de *stock*, não sendo permitido não atender à procura de cada um dos períodos e, muito menos, de não ser atendida de todo.

Capítulo 3 Modelos Matemáticos na Literatura

Atualmente, já se encontram muitos trabalhos realizados na área de escalonamento da produção e dimensionamento de lotes, em que se recorre a modelos matemáticos para a resolução deste tipo de problemas. Segundo Luz e Pereira (2015), pode considerar-se a Investigação Operacional (IO) como uma ponte entre a realidade e a Matemática que pretende resolver problemas do dia a dia com técnicas científicas. Podemos esquematizar na Figura 11 a metodologia usada na resolução de um problema do seguinte modo:

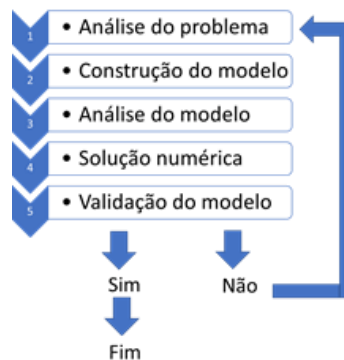


Figura 11 - Metodologia de resolução de um problema

Um modelo é uma representação simplificada de um sistema real que tenta destacar as relações principais entre certos objetos. Os elementos controláveis da realidade traduzem-se em variáveis no modelo e mediante certas equações (e/ou inequações) traduzem as suas implicações nas limitações dos recursos. Esta simplificação não é gratuita, mas é forçosamente utilizada pela complexidade da realidade e, simultaneamente, pela exigência da total precisão na Matemática. Como a simplificação produz uma distorção entre o sistema real (problema) e a sua imagem (modelo), é necessário existirem vários processos de controlo para garantir o mínimo de validade das conclusões retiradas. Estes processos de validação não são simples e requerem numerosas fases interativas entre a realidade e o modelo, conduzidas por um especialista de IO. Descrevendo cada uma das fases desta metodologia:

- Análise do problema: extrai do sistema real os objetos e relações relevantes;
- Construção do modelo (ou formulação ou modelação): descreve matematicamente o resultado da primeira fase;
- Análise do modelo: deduz analiticamente conclusões sobre o modelo matemático tais como:
 - existência e unicidade das soluções ótimas,

- condição de otimalidade pela caracterização analítica das soluções ótimas,
- estabilidade das soluções ao alterar os parâmetros que definem o problema;
- Solução numérica: desenvolve algoritmos de resolução destinados a determinar a solução do modelo matemático auxiliando-se das conclusões analíticas da terceira fase;
- Validação do modelo: esta validação processa-se a partir do passo anterior, verificando-se se existem relações importantes não consideradas na construção do modelo.

Tal como foi referido por Luz e Pereira (2015), a metodologia da IO baseia-se na construção de modelos matemáticos – modelação ou programação matemática – que representem a realidade e que permitam analisá-la e conseguir “orientá-la” com vista a atingir os objetivos pretendidos. O primeiro passo a definir nesta metodologia consiste em definir que realidade ou que problema vai ser modelado, isto é, quais as fronteiras que devemos considerar por forma a incluir/excluir determinada informação no modelo. Após a definição do "domínio" do problema é necessário definir, dentro deste, quais as relações com o meio envolvente, as quais podem ser determinísticas, incertas ou completamente aleatórias. Olhando agora para o interior do problema carece de identificar as variáveis de decisão, os recursos existentes, os constrangimentos legais a satisfazer, etc.

Após a análise e definição matemática do modelo, este é sujeito a metodologias adequadas de resolução que podem variar desde algoritmos exatos (que buscam ótimos absolutos, podendo não os alcançar) até heurísticas (que fornecem ótimos locais podendo alcançar os ótimos absolutos).

De seguida, introduz-se alguns conceitos básicos de programação matemática.

3.1. Programação Matemática

A Programação Matemática (PM) ocupa-se de problemas de decisão em que se pretende otimizar (maximizar ou minimizar) um objetivo, que depende de um número finito de variáveis. Estas variáveis podem ser independentes umas das outras ou podem estar relacionadas através de uma ou mais restrições.

Num problema de PM o objetivo e as restrições são dadas como funções matemáticas e relações funcionais, podendo ter a seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 &\text{Otimizar } Z = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\
 &\text{Sujeito a, } \quad g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \begin{matrix} \leq \\ = \\ \geq \end{matrix} b_1 \\
 &\quad \quad \quad g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \begin{matrix} \leq \\ = \\ \geq \end{matrix} b_2 \\
 &\quad \quad \quad \vdots \\
 &\quad \quad \quad g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \begin{matrix} \leq \\ = \\ \geq \end{matrix} b_m
 \end{aligned}$$

onde:

- x_1, x_2, \dots, x_n designam-se como variáveis de decisão;
- $Z = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ designa-se por função objetivo (FO), traduzindo a finalidade do problema a resolver, e essa finalidade pode ser maximizar ($\max Z$) ou minimizar ($\min Z$) a função;
- $g_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$, com $i = 1, 2, \dots, m$, designam-se genericamente por restrições, traduzindo as limitações de matérias primas, recursos humanos, de máquinas, etc;
- se existirem condições do tipo $x_j \geq 0$, com $j = 1, 2, \dots, n$, designam-se por restrições de não negatividade.

Existem diversos tipos de problemas de PM que podem ser considerados de acordo com as características das variáveis e das equações/inequações que descrevem o modelo. Um problema de Programação Linear (PL) é um problema de PM em que as condições $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ e $g_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$, com $i = 1, 2, \dots, m$, são funções lineares dos respetivos argumentos.

Um problema de Programação Linear Inteira (PLI) é um problema de PL em que as variáveis são não negativas e inteiras. Quando todas as variáveis são inteiras o modelo é denominado de Programação Linear Inteira Pura, caso contrário, é denominado de Programação Linear Inteira Mista (PLIM).

Entre os algoritmos para resolver este tipo de problemas temos os de Corte e de Pesquisa em Árvore. A resolução de um PLI aparenta ser fácil, no entanto, é bastante complexa quando se trata de problemas reais com um número significativo de variáveis. Isso significa que as necessidades computacionais aumentam exponencialmente quando o tamanho do problema aumenta.

3.2. Revisão Bibliográfica

Existe atualmente uma vasta literatura sobre problemas de escalonamento e de dimensionamento de lotes. Este tipo de problemas é geralmente formulado usando modelos de PLI e PLIM, o que significa que as suas resoluções poderão ser de grande complexidade.

Nesta secção far-se-á uma revisão bibliográfica por alguns dos modelos, sem ser demasiado exaustiva, destacando-se as variáveis utilizadas e as FO, quando se achar pertinente para o fim a que nos propomos neste trabalho. Apesar de também se ter analisado as restrições dos diversos modelos, pois tal seria necessário para a futura definição do nosso modelo, considerámos que a sua exposição iria exceder em demasia o âmbito do trabalho. O modelo desenvolvido será uma ferramenta importante de suporte ao processo de tomada de decisão no que diz respeito ao plano de produção.

Os primeiros modelos simples de planeamento de *Job Shop* que se conhecem permitem apenas a alocação de n tarefas por máquinas, por simples restrições de não interferência e precedência (Manne, 1960). Esses modelos também consideram os prazos de entrega com o objetivo de minimizar o *makespan* (tempo total de escalonamento). Posteriormente, foram desenvolvidos novos modelos que

consideram máquinas idênticas por estágio de produção (*Flexible Job Shop*) e caminhos produtivos onde alguns produtos passam pelo mesmo estágio mais de uma vez (recirculação), aumentando a complexidade do modelo e, conseqüentemente, da sua resolução (Gomes *et al.*, 2005; Gomes *et al.*, 2008).

Para superar essa dificuldade, são consideradas abordagens heurísticas. Em comparação com as abordagens exatas para produzir resultados ótimos, essas abordagens produzem resultados quase-ótimos muito mais rapidamente do que as abordagens exatas. De um modo geral, essas abordagens heurísticas começam com uma solução inicial não ideal e, por meio de movimentos e trocas, produzem gradualmente melhores soluções. Para Marques (2018), estes resultados são confiáveis do ponto de vista industrial, uma vez que são rápidos de produzir, permitindo uma tomada de decisão mais rápida e realista.

Para os problemas de escalonamento, destacam-se três tipos de heurística utilizados na literatura: *Simulated Annealing* (SA), *Tabu Search* (TS) e *Genetic Algorithm* (GA). A sua extensa utilização deve-se à facilidade com que se aplicam a diversos problemas de otimização, uma vez que se trata de estruturas algorítmicas gerais e adaptáveis. Estas heurísticas são geralmente denominadas de meta-heurísticas.

Por exemplo, Józefowska (1998) estudou as aplicações de SA, TS e GA ao mesmo problema de escalonamento *Job Shop*, com uma única etapa de produção em que máquinas idênticas em paralelo processam n tarefas com restrições de recursos. A autora conclui que para este tipo de problema o melhor algoritmo é o método TS, apresentando o maior conjunto de soluções quase-ótimas e o menor desvio da solução ótima para todos os diferentes tamanhos de problemas analisados.

Posteriormente, Logendran *et al.* (2007) consideram a aplicação de uma heurística TS para um ambiente produtivo com m máquinas paralelas e não relacionadas com tempos de *setup* dependentes da sequência (FJS-SDST). Este trabalho apresenta seis diferentes algoritmos de pesquisa e quatro diferentes métodos iniciais de geração de soluções, e mostra que a qualidade da solução inicial permite alcançar melhores resultados de forma mais eficiente.

Fattahi *et al.* (2007) consideram duas abordagens para resolver o FJS usando heurísticas: uma abordagem hierárquica e uma abordagem integrada. Esses problemas compreendem os dois sub-problemas de alocação e de sequenciamento. A diferença entre as duas abordagens está em como elas abordam ambos os sub-problemas, em que a abordagem integrada aborda os dois sub-problemas ao mesmo tempo e os níveis hierárquicos separadamente para reduzir a complexidade do problema. A abordagem hierárquica usa duas heurísticas separadas para cada sub-problema, uma para alocação e outra para o sequenciamento. Ambas as heurísticas trabalham iterativamente (desde uma solução inicial) até o critério de paragem ser satisfeito. Neste artigo, vários modelos são estudados combinando TS e SA para cada sub-problema.

Gao *et al.* (2008) aplicaram um heurística GA com um procedimento de pesquisa local de vizinhança variável à estrutura FJS. Uma metodologia de SA para o dimensionamento e escalonamento de instalações multi-tarefa de operação descontínua foi desenvolvida por Chibeles-Martins (2010) e

sua comparação foi feita com uma abordagem exata do mesmo problema. O mesmo autor Chibeles-Martins (2011) estende o trabalho anterior através da aplicação de uma abordagem multiobjetivo e foi desenvolvida uma caracterização eficiente da fronteira de Pareto como ferramenta de apoio à decisão. Kim (2002) aplica um heurística SA para a minimização do atraso máximo total da produção, em que o algoritmo modela um processo produtivo FJS-SDST. A função objetivo assume a expressão $\min \sum_{i=1}^L \max(C_i - d_i, 0)$, onde C_i é o tempo de conclusão do lote i , d_i a data de vencimento do lote i e L o número de lotes. Cada lote é composto por vários produtos diferentes e o tempo de conclusão de um lote é o tempo de conclusão do último produto do lote. Nesse caso, a geração inicial da solução para o modelo segue a regra da Data de Vencimento Mais Precoce, alocando os lotes às máquinas em ordem crescente das datas de vencimento.

Ao analisar modelos matemáticos de escalonamento, foram encontradas várias formulações diferentes de Programação Linear Inteira na literatura. Surgem três formulações distintas, descritas por Wagner (1959), Manne (1960) e Wilson (1989). Analisando sucintamente as três formulações, percebemos que têm a mesma função objetivo em que se pretende minimizar o atraso total das produções, mas com abordagens diferentes:

- A formulação de Wagner (1959) gira em torno dos relacionamentos entre tempos de inatividade, tempos de espera e tempos de processamento de tarefas consecutivas entre máquinas consecutivas.
- A formulação de Manne (1960) gira em torno dos relacionamentos entre tempos de conclusão, tempos de processamento e requisitos de precedência de tarefas consecutivas entre máquinas consecutivas.
- A formulação de Wilson (1989) gira em torno das relações entre os horários de início e os tempos de processamento de tarefas consecutivas entre máquinas consecutivas.

No artigo de Zhu & Heady (2000) é apresentada uma formulação matemática de um processo com três fases de produção em que abordam o problema de escalonamento de produção dependente da sequência (FJS-SDST) com penalidades por antecipação e atraso na produção. A função objetivo corresponde à minimização da soma das penalidades por antecipação e atraso na produção e é dada por:

$$\min Z = \sum_{i=1}^N (e_i E_i + t_i T_i)$$

com as seguintes variáveis:

X_i - instante de conclusão do produto i ;

E_i – amplitude do intervalo de tempo se o produto i for concluído mais cedo do que a sua data de conclusão pretendida d_i ;

T_i – amplitude do intervalo de tempo se o produto i for concluído mais tarde do que a sua data de conclusão pretendida d_i ;

Y_{ijm} – variável binária, igual a 1 se o produto i for antecessor imediato do produto j na máquina m (logo j é sucessor imediato de i), e 0 caso contrário;

Z_{im} – variável binária, igual a 1 se o produto i for processado na máquina m , e 0 caso contrário e os seguintes parâmetros:

N – número de produtos a produzir;

e_i – penalidade por unidade de tempo pelo produto i ser produzido mais cedo do que a data devida;

t_i – penalidade por unidade de tempo pelo produto i ser produzido mais tarde do que a data devida.

Araújo & Arenales (2003) desenvolvem o estudo de um problema prático que ocorre numa fundição que tem apenas um forno em operação por período, consistindo no gargalo do processo produtivo, e várias máquinas de moldagem. As máquinas produzem diferentes tipos de produtos que devem ser feitos com diferentes ligas, com pedidos conhecidos de cliente. Em cada período, a programação da produção envolve dois níveis importantes de decisão que estão inter-relacionados: 1) qual a liga que deve ser produzida no forno; 2) a quantidade de cada produto a ser produzida em cada máquina de moldagem. Num estudo anterior, foi proposto um modelo de dimensionamento de lotes por estágio único, com restrições de capacidade, máquinas paralelas e múltiplos itens. Nesse trabalho foram realizadas extensões do modelo e do método de resolução, considerando-se custos de preparação e admitindo-se atrasos na data de entrega. Esta abordagem fornece ao decisor possíveis rearranjos nos pedidos do cliente, caso não seja possível o atendimento sem atraso. Note-se que neste estudo, para além do escalonamento, também é considerado o planeamento da quantidade a produzir. A função objetivo correspondente à minimização dos custos de *stock* ao serem aplicadas penalizações nos atrasos na produção dos pedidos e é dada por:

$$\min Z = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (H_i^- I_{iT}^- + H_i^+ I_{iT}^+) + \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T (CS_k Z_t^k);$$

com as seguintes variáveis:

X_{imt} - fração de tempo no período t utilizado para produzir os produtos do tipo i na máquina m ;

I_{it}^+ - *stock* do produto i no final do período t ($I_{i0}^+=0$);

I_{it}^- - quantidade atrasada do produto i no final do período t ($I_{i0}^-=0$);

Y_t^k - variável binária que indica se o produto k é produzido no período t ;

Z_t^k - variável que indica se será aplicado o custo de preparação para o produto k no período t (apesar desta variável ser não negativa e contínua, as características do modelo fazem com que ela assumam apenas valores 0 ou 1);

e os seguintes parâmetros:

N – número de produtos;

T – número de períodos de tempo;

K – número de ligas;

H_i^- - penalidade por atrasar uma unidade do produto i de um período para o próximo;

H_i^+ - custo de *stock* por unidade do produto i de um período para o próximo.

Gomes M. (2007), a partir das variáveis de Manne (1960), desenvolve dois modelos PLIM para resolver um problema de escalonamento FJS (com recirculação e montagem) numa indústria de produção de moldes. O primeiro modelo utiliza uma escala temporal discreta, modelando o tempo de forma explícita, e prescinde ainda da utilização de variáveis de afetação às máquinas. Para o segundo modelo desenvolvido a escala de tempo é contínua. Neste caso, o tempo é modelado de forma implícita e são utilizadas variáveis binárias para afetar as tarefas às máquinas que as realizam. Estes aspetos conduzem a uma redução do tempo de computação na resolução do problema, mostrando-se assim ser uma abordagem mais eficaz. Não foram tidos em conta tempos de *setup* dependentes da sequência das tarefas. A função objetivo representa a minimização da soma ponderada de adiantamento, atraso e tempo de armazenamento intermediário.

Num artigo de Ronconi & Birgin (2010) foram medidos os tempos de computação para quatro modelos conhecidos na literatura para o problema de escalonamento FJS quando aplicados a um conjunto de instâncias, variando o número de tarefas e o número de máquinas. A função objetivo utilizada foi sempre a mesma - minimização da antecipação e do atraso total: $\min Z = \sum_{j=1}^n E_j + T_j$, onde E_j corresponde ao tempo de antecipação da tarefa j e T_j ao tempo de atraso da tarefa j . Essas formulações foram executadas através do *solver* comercial CPLEX. Os resultados mostraram cinco resultados semelhantes entre as formulações de Wagner (1959) e Wilson (1989), sendo a última um pouco mais rápida. As formulações de Manne (1960) e uma sua extensão foram significativamente mais lentas e até inviáveis para amostras grandes (15 tarefas e 10 máquinas).

Virgílio (2011), adaptando o modelo de tempo discreto desenvolvido por Gomes (2007), desenvolveu um modelo PLI para resolver um problema de escalonamento FJS de produção no setor dos moldes, que corresponde a uma indústria de produção discreta por encomenda. O modelo foi implementado na linguagem de modelação GAMS e resolvido com o *solver* comercial CPLEX. O autor inclui um exemplo ilustrativo de aplicação do modelo (de reduzida dimensão) e um caso de estudo real que consiste na obtenção de um plano de produção para a empresa GECO, envolvendo peças de vários moldes. A função objetivo representa a minimização da soma de todas as penalizações (existência de peças incompletas no final do horizonte de escalonamento, finalização da produção de peças do molde k antes ou depois da respetiva data de entrega D_k e pelo tempo de espera de peças inacabadas em *buffers* intermédios).

Quanto a modelos para o problema de dimensionamento de lotes, os primeiros desenvolvimentos nesse campo têm as suas raízes no modelo desenvolvido por Harris (1913), posteriormente estendido por Wagner & Whiten (1958). Desde então, várias variantes de modelos têm sido desenvolvidas para adaptar as diferentes características inerentes aos problemas de dimensionamento de lotes.

O modelo de Wagner & Whiten (1958) é para um problema de horizonte temporal finito e

discreto, procura dinâmica, possibilidade de pedidos pendentes, sem restrições de capacidade e uma estrutura de custos geral. É sabido que um problema sem restrições de capacidade para n itens pode ser facilmente dividido em n problemas sem restrições de capacidade para um item. A formulação é dada por:

$$\min \sum_{t=1}^T (V_t X_t + h_t I_t)$$

s.a:

$$I_{t-1} + X_t - d_t = I_t \quad , \quad t = 1, \dots, T$$

$$I_0 = I_T = 0$$

$$X_t \geq 0, \quad t = 1, \dots, T$$

onde:

T – número de períodos;

d_t – procura no período t ;

V_t – custo unitário de produção no período t ;

H_t – custo unitário de armazenamento no período t ;

e as seguintes variáveis:

X_t – quantidade a produzir no período t ;

I_t – *stock* no final do período t .

Trigueiro *et al.* (1989) apresentam uma formulação para o problema de dimensionamento de lotes com restrições de capacidade e com tempos de *setup* independentes da sequência, e apresentam um algoritmo para a sua resolução. Esta formulação é baseada no modelo de Bellington *et al.* (1983), mas com uma simplificação na nomenclatura, e é dada por:

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (H_{it} I_{it} + C_{it} X_{it} + S_{it} Y_{it})$$

s.a:

$$I_{it-1} + X_{it} - I_{it} = d_{it} \quad , \quad i = 1, \dots, N, \quad t = 1, \dots, T$$

$$\sum_{i=1}^N b_i X_{it} + \sum_{i=1}^N s_i Y_{it} \leq CAP_t, \quad t = 1, \dots, T$$

$$X_{it} - M Y_{it} \leq 0, \quad i = 1, \dots, N, \quad t = 1, \dots, T$$

$$I_{i0} = 0$$

$$X_{it} \geq 0, I_{it} \geq 0, \quad i = 1, \dots, N, \quad t = 1, \dots, T$$

com as seguintes variáveis:

I_{it} – nível de *stock* do item i no final do período t ,

X_{it} – quantidade a produzir do item i no período t ,

Y_{it} – variável binária que assume o valor 1 se o produto i é produzido no período t , e 0 caso contrário;

e os seguintes parâmetros:

T – número de períodos no horizonte temporal;

N – número de itens a produzir;

H_{it} – custo unitário de armazenamento do item i no período t ,

C_{it} – custo unitário de produção do item i no período t ,

S_{it} - custo unitário de *setup* do item i no período t ,

d_{it} – procura do item i no período t ,

b_i – tempo unitário de produção do item i ;

s_i – tempo unitário de *setup* para o item i ;

CAP_t – limite de capacidade para o período t ,

M – um número muito grande.

Em 2003, Karimi *et al.* (2003) apresentaram uma extensa revisão bibliográfica de modelos e algoritmos de resolução para o problema de dimensionamento de lotes com restrições de capacidade.

Mais recentemente, Copil *et al.* (2017) publicaram um artigo com uma revisão geral da literatura no que concerne a problemas de escalonamento e dimensionamento de lotes em simultâneo. Introduziram um esquema de classificação dos problemas, uma revisão do desenvolvimento histórico da investigação na área e identificaram os desenvolvimentos recentes.

O escalonamento da produção de lotes, bem como o seu dimensionamento, é uma área de investigação de crescente interesse dentro do campo mais amplo do planeamento de produção. Em muitos casos reais da indústria, principalmente na indústria de processos, a relação estreita entre dimensionamento e escalonamento de lotes torna imperativo que ambas as decisões sejam tomadas simultaneamente, a fim de usar as capacidades com eficiência. Os modelos tradicionais têm sido cada vez mais melhorados para incorporar mais detalhes e integrar o dimensionamento de lotes com o escalonamento (Clark *et al.*, 2011). O dimensionamento de lotes e escalonamento pode ser também combinado com distribuição, rotas de veículos ou decisões de corte e empacotamento, etc. (Pochet & Wolsey, 2006). Naturalmente, o aumento do realismo torna os modelos matemáticos mais complexos. Essa complexidade adicional e a necessidade de aumentar o tamanho das instâncias solucionáveis, com soluções próximas da ótima, exigem a integração de métodos existentes com algoritmos de otimização novos e eficientes, juntamente com o desenvolvimento de modelos mais robustos e desigualdades fortes, com base nas estruturas poliédricas dos modelos (Clark *et al.*, 2011).

Capítulo 4 O Planeamento de Produção na Autoneum Setúbal

O planeamento de produção na Autoneum Setúbal, compreende três níveis de impacto: um nível estratégico, tático e operacional. Neste trabalho abordamos o nível tático e operacional.

Ao nível tático, a Autoneum Setúbal recebe, no início de cada projeto, um plano de pedidos de cliente, geralmente anual, de produtos com base numa previsão de necessidades. Este plano suporta um planeamento inicial de produção feito pela Autoneum Setúbal, que é usado pelo Responsável de PC&L (*Production Controler & Logistic*) e pelo Responsável de Produção, para analisar as capacidades de produção e as necessidades de matéria-prima associadas ao projeto.

Após as capacidades e as necessidades validadas, esta informação segue para um nível mais detalhado, o nível operacional. Nesse nível, a Autoneum Setúbal toma as suas decisões semanalmente. São decididas as quantidades de produto de cada referência que deve produzir e em qual ou quais máquinas, ou seja, o dimensionamento de lotes e o escalonamento de produção pelas máquinas.

Antes de abordar detalhadamente o planeamento na Autoneum Setúbal, é importante entender, não apenas, o relacionamento entre a Autoneum Setúbal e os clientes, mas também as características dos produtos que têm impacto na gestão de materiais e na operação de produção.

Os clientes da Autoneum Setúbal pertencem à indústria automóvel, operam com produções em linha e num sistema JIT, sendo fundamental que não haja rutura do produto na sua linha de montagem e, conseqüentemente, paragem de produção. No entanto, acionam baixos níveis de *stock* de produto acabado. Significa que o *modus operandi* do cliente, sem um plano integrado e eficiente com a Autoneum Setúbal, torna-se muito arriscado quer para a produção da Autoneum Setúbal quer para o cliente. As produções dos clientes dependem muito das suas encomendas reais e não de previsões. As encomendas dos clientes podem mudar rapidamente e a Autoneum Setúbal deve ter a capacidade de se adaptar e reagir rapidamente a essas alterações de pedidos para garantir que não haja quebras de produção, no cliente e na Autoneum Setúbal.

Tendo esses riscos em mente, foram acordados inventários de segurança na Autoneum Setúbal. Esses inventários são estabelecidos por referência de produto e são atualizados no plano de entrega semanal. Cada referência de produto tem um código que define quantas semanas de pedidos (do plano anual de pedidos de cliente) o *stock* deve atender. Os níveis de *stock* têm apenas uma limitação máxima e não uma limitação mínima, dando uma maior liberdade à Autoneum Setúbal para gerir os seus níveis de *stock*.

Em resumo, o planeamento da produção ao nível tático e operacional é caracterizado da seguinte forma (Figura 12):

1. O cliente apresenta no início do projeto a previsão anual de pedidos;
2. O cliente apresenta à Autoneum Setúbal o seu plano de entrega semanal;
3. Na Autoneum Setúbal, o planeamento é feito semanalmente, com as informações enviadas pelo cliente;
4. O planeamento da produção considera a programação da produção em cada máquina individualmente;
5. Os níveis de *stock* são definidos para cada referência de produto individualmente, sendo que a Autoneum Setúbal é responsável apenas pelo seu *stock*;
6. O tempo de distribuição é tido em conta, uma vez que as fábricas estão maioritariamente localizadas em países diferentes;
7. Os tempos de processamento, datas de entrega, tempos de preparação e níveis de *stock* são de grande relevância para o planeamento.

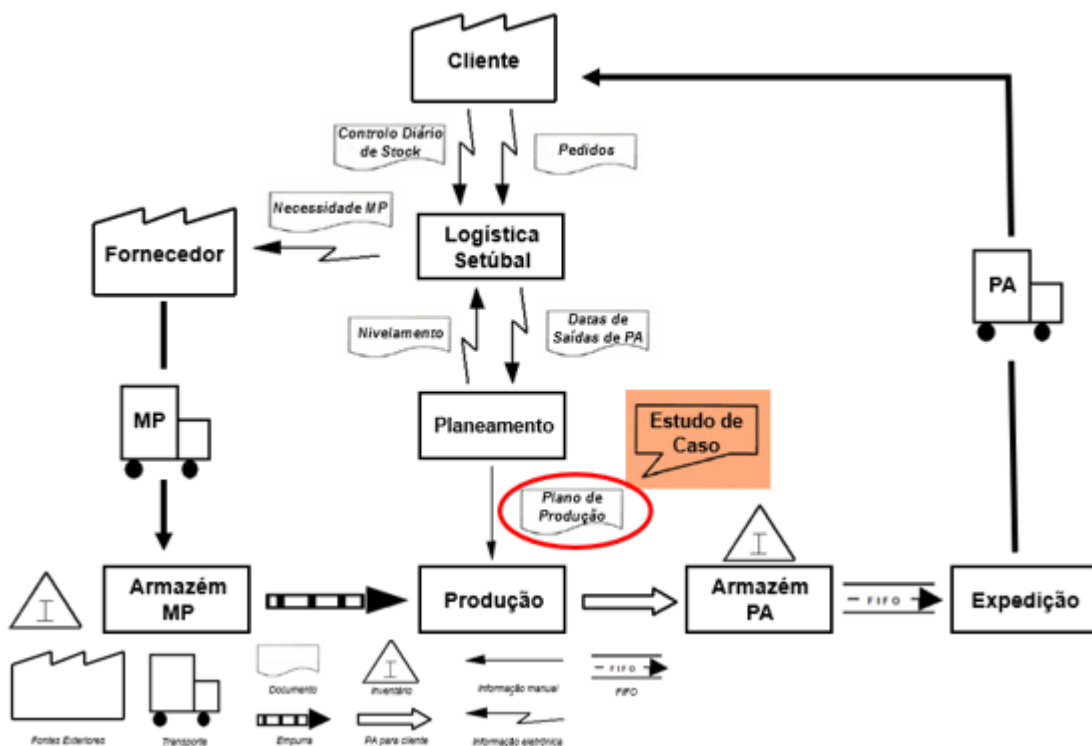


Figura 12 - Fluxo de informação no planeamento de produção Autoneum Setúbal

4.1. Estudo de Caso

Nesta subsecção, aborda-se o estudo de um caso real de planeamento operacional de produção na Autoneum Setúbal, com um horizonte temporal de uma semana. A fábrica trabalha de segunda a sexta-feira o que corresponde a um planeamento para 5 dias. O plano de produção aqui apresentado engloba o escalonamento e dimensionamento de lotes para 20 produtos em 12 máquinas.

Atualmente, o planeamento de produção é elaborado pelo planeador de produção da fábrica com base na sua experiência, recorrendo ao *software* Excel, não sendo no entanto suportado por nenhum outro *software* ou algoritmo de planeamento. Esta operação é apoiada por informações sobre previsões de pedidos, níveis de *stock* na Autoneum Setúbal, e no cliente, e um plano de entrega semanal. Também considera a capacidade de armazenamento e a disponibilidade de matéria-prima, que podem afetar o plano de produção.

Na Tabela 2 podem ser observados as máquinas e o tipo de produtos a escalonar, ou seja, indicam-se as máquinas que se encontram habilitadas para a produção dos mesmos. Podemos também observar o tempo de processamento de cada unidade de produto e o número de operários necessário para a sua produção.

Como o planeamento é feito semanalmente, é importante referir os procedimentos usuais para elaborar o plano de programação de produção:

1. Começa-se por analisar a atualização do plano de entregas e pedidos do cliente, juntamente com as atualizações de previsões e *stocks*;
2. Faz-se o download das ordens sugeridas pelo SAP em formato Excel e atualiza-se o *stock* em concordância com essas ordens (exemplo na Tabela 3 de um plano de pedidos para um período específico);
3. Os dados extraídos são trabalhados através de tabelas pivot de modo a conseguir um *layout* do plano provisório de produção (Figura 13) mais adequado e amigável.

Neste plano provisório já se tem informações relativamente à produção diária (cinco dias úteis), para cada um dos três turnos diários, ou seja, já se tem uma primeira versão do dimensionamento dos lotes e do escalonamento.

Tabela 2 - Dados BOM referentes aos produtos a escalonar

Referência	Descrição	nº SAP	Centro de Trabalho	N.º operários necessários (O)	Tempo de processamento /unidade (p)
1	HS1	106003710103	Máquina 6	6	0,005882
			Máquina 9		0,005882
2	HS2	106011460105	Máquina 5	6	0,007692
			Máquina 11		0,007692
			Máquina 12		0,007692
3	HS3	106011480105	Máquina 7	2	0,002500
			Máquina 8		0,002500
			Máquina 10		0,002500
4	HS4	106011500102	Máquina 1	3	0,002500
			Máquina 4		0,002500
			Máquina 7		0,002500
5	HS5	106011520103	Máquina 7	4	0,005000
			Máquina 8		0,005000
			Máquina 10		0,005000
6	HS6	106011540103	Máquina 1	4	0,002273
			Máquina 4		0,002273
			Máquina 10		0,002273
7	HS7	106011560104	Máquina 1	3	0,002500
			Máquina 4		0,002500
			Máquina 7		0,002500
8	HS8	106012650103	Máquina 1	7	0,002500
			Máquina 4		0,002500
			Máquina 7		0,002500
9	HS9	106012680104	Máquina 4	6	0,005882
			Máquina 5		0,005882
			Máquina 6		0,005882
10	HS10	106037710104	Máquina 7	2	0,006250
			Máquina 8		0,006250
			Máquina 10		0,006250
11	HS11	106037720103	Máquina 2	4	0,005000
12	HS12	106164910104	Máquina 1	3	0,004545
			Máquina 4		0,004545
			Máquina 7		0,004545
13	HS13	106247660105	Máquina 11	6	0,013333
14	HS14	106247670104	Máquina 12	6	0,012500
15	HS15	106320590102	Máquina 7	2	0,004545
			Máquina 8		0,004545
			Máquina 10		0,004545
16	HS16	106339860103	Máquina 6	6	0,005882
			Máquina 9		0,005882
17	HS17	106373180102	Máquina 2	2	0,005000
			Máquina 3		0,005000
18	HS18	106377090102	Máquina 7	2	0,006250
			Máquina 8		0,006250
			Máquina 10		0,006250
19	HS19	106386430104	Máquina 9	4	0,006667
			Máquina 11		0,006667
			Máquina 12		0,006667
20	HS20	106395280103	Máquina 7	3	0,005000
			Máquina 8		0,005000
			Máquina 10		0,005000

Tabela 3 - Plano de pedidos do cliente para um período específico

Nº SAP	Descrição	Stock dia 0	Pedido do dia 1	Stock do dia 1	Pedido do dia 2	Stock do dia 2	Pedido do dia 3	Stock do dia 3	Pedido do dia 4	Stock do dia 4	Pedido do dia 5	Stock do dia 5	Pedido do dia 6	Stock do dia 6
106011480105	HS3	3 260	3200	60	0	2940	2200	740	0	740	0	3620	3600	20
106011500102	HS4	2 800	2800	2880	2800	80	0	80	0	80	0	2960	2800	160
106012650103	HS8	333	0	333	0	6093	6000	93	0	93	0	93	2800	173
106011520103	HS5	1 400	1400	1156	1100	1496	1400	1252	1200	1492	1400	1532	1400	132
106011540103	HS6	1 301	1200	6437	6328	8988	8839	2692	2471	9100	8839	5972	5431	541
106011560104	HS7	220	0	3100	3000	100	0	100	0	100	0	2980	2960	20
106037710104	HS10	1 661	1400	2565	2400	1090	1000	90	0	90	0	2394	2200	194
106037720103	HS11	0	0	0	0	1440	1400	1480	1400	1520	1400	1560	1400	160
106377090102	HS18	1 220	1200	20	0	20	2096	2000	96	0	1248	1200	48	
106320590102	HS15	1 600	1400	200	0	1616	1400	216	0	216	0	1632	1400	232
106373180102	HS17	180	0	2776	2100	2116	2100	1172	1050	1562	1050	512	0	512
106386430104	HS19	930	900	30	0	1110	900	1077	900	1257	1100	1237	1100	137
106395280103	HS20	1 680	1600	1520	1480	40	0	40	0	40	0	1480	1400	80
106164910104	HS12	3 232	3200	3200	3200	4128	4088	40	0	40	0	4480	4400	80
106011460105	HS2	941	900	41	0	977	900	1013	900	113	0	113	0	113
106012680104	HS9	176	0	176	0	1264	1176	88	0	88	0	1176	1176	0
106003710103	HS1	1 354	1200	1378	1200	2327	2200	1351	1200	2300	2200	1324	1200	124
106247660105	HS13	1 570	1500	1150	1000	1664	1500	1678	1500	1692	1500	1272	1200	72
106339860103	HS16	2 460	2400	60	0	2209	2100	1333	1200	1058	1000	2207	2101	106
106247670104	HS14	1 850	1500	350	0	1502	1500	1616	1500	1730	1500	1844	1500	344

Centro Trabalho	Nº SAP	Descrição	Dia 1			Dia 2			Dia 3			Dia 4			Dia 5		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Máquina 1	106011540103	HS6		3168	3168	2543	3168	3168	2543								
	106164910104	HS12		1584	1584	1272	1584	1272									
	106012650103	HS8					2880	2880									
	106011540103	HS6									2543	3168	3168				
	106164910104	HS12												1272	1584	1584	
	106011540103	HS6													3168	2543	
106012650103	HS8															2880	
Máquina 2	106037720103	HS11				1440			1440			1440					1440
Máquina 3	106373180102	HS17	1156	1440				1440	1156			1440					
Máquina 4	106011500102	HS4		2880													
	106011560104	HS7		2880													
	106011560104	HS7															2880
	106011500102	HS4															2880
Máquina 5	106012680104	HS9				1088										1088	
Máquina 6	106003710103	HS1			1224	925	1224										
	106339860103	HS16				925	1224										
	106339860103	HS16								1224	925						
	106003710103	HS1								1224	925	1224					
	106339860103	HS16													1224	925	
	106003710103	HS1														1224	
Máquina 7	106011480105	HS3					2880										
	106320590102	HS15					1416										
	106320590102	HS15															1416
	106011480105	HS3															2880
Máquina 8	106011520103	HS5		1156													
	106037710104	HS10		1152	1152	925											
	106011520103	HS5						1440	1156								
	106011520103	HS5									1440						
	106037710104	HS10													1152	1152	
106011520103	HS5															1440	
Máquina 9	106386430104	HS19					1080	867			1080					1080	
Máquina 10	106395280103	HS20		1440													
	106377090102	HS18							924	1152							
	106395280103	HS20															1440
	106377090102	HS18															1152
Máquina 11	106247660105	HS13		540	540	434	540	540									
	106011460105	HS2						936									
	106247660105	HS13							434	540	540						
	106011460105	HS2								936							
	106247660105	HS13										434	540	540			
	106247660105	HS13													540	540	
106011460105	HS2													936	864		
Máquina 12	106247670104	HS14				576	576	462	576	576	462	576	576	462	576	576	
Total			1156	16240	7668	7024	18956	12396	7542	4644	3564	5289	10908	4284	1734	10268	28896

Figura 13 - Cenário real de um plano provisório de produção

4. Processo de obtenção do plano final de produção:

- a. Conversão do tipo de peças a produzir em número de operadores necessários, pois dependendo do tipo de peças as necessidades de operadores poderão diferir (Figura 14).

Centro Trabalho	Nº SAP	Descrição	Dia 1			Dia 2			Dia 3			Dia 4			Dia 5		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Máquina 1	106011540103	HS6		4	4		4	4	4	4							
	106164910104	HS12		3	3		3	3	3								
	106012650103	HS8						7									
	106011540103	HS6									4	4	4				
	106164910104	HS12													3	3	3
	106011540103	HS6														4	4
	106012650103	HS8															7
Máquina 2	106037720103	HS11					4			4			4				4
Máquina 3	106373180102	HS17	2	2				2				2					
Máquina 4	106011500102	HS4		3													
	106011560104	HS7		3													
	106011560104	HS7															3
	106011500102	HS4															3
Máquina 5	106012680104	HS9					6									6	
Máquina 6	106003710103	HS1			6		6										
	106339860103	HS16				6	6										
	106339860103	HS16							6	6							
	106003710103	HS1							6	6	6						
	106339860103	HS16													6	6	
	106003710103	HS1															6
Máquina 7	106011480105	HS3				2	2										
	106320590102	HS15					2										
	106320590102	HS15															2
	106011480105	HS3															2
Máquina 8	106011520103	HS5		4													
	106037710104	HS10		2	2	2											
	106011520103	HS5						4	4								
	106011520103	HS5									4						
	106037710104	HS10													2	2	
	106011520103	HS5															4
Máquina 9	106386430104	HS19					4	4			4					4	
Máquina 10	106395280103	HS20		3													
	106377090102	HS18						2	2								
	106395280103	HS20															3
	106377090102	HS18															2
Máquina 11	106247660105	HS13		6	6	6	6	6									
	106011460105	HS2					6										
	106247660105	HS13						6	6	6							
	106011460105	HS2							6								
	106247660105	HS13									6	6	6				
	106247660105	HS13														6	6
	106011460105	HS2														6	6
Máquina 12	106247670104	HS14				6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Total	Operadores necessários		2	30	21	29	51	36	28	24	24	28	36	16	9	39	73

Figura 14 - Necessidade de operadores num cenário real de um plano provisório de produção

b. Alocação das produções ao longo da semana (Figura 15) pelos centros de trabalho (máquinas), tendo em conta que:

- i. Cada centro de trabalho só pode produzir um produto de cada vez;
- ii. Cada produto só pode ser produzido num centro de trabalho de cada vez;
- iii. O centro de trabalho inicialmente alocado para produção pode ser alterado.

Centro Trabalho	Nº SAP	Descrição	Dia 1			Dia 2			Dia 3			Dia 4			Dia 5				
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
Máquina 1	106011540103	HS6		3168	3168	2543	3168	3168	2543				2543	3168	3168				
	106011540103	HS6															3168	2543	
	106011540103	HS6																	
Máquina 2	106037720103	HS11				1440			1440			1440						1440	
Máquina 3	106373180102	HS17	1156	1440			1440	1156			1440								
Máquina 4	106011500102	HS4		2880															
	106011560104	HS7			2880														
	106012650103	HS8				2880	2880												
	106012650103	HS8										2880							
	106011560104	HS7														2880			
	106011500102	HS4																2880	
Máquina 5	106012680104	HS9				1088													
	106011460105	HS2					936												
	106011460105	HS2							936										
	106012680104	HS9												1088					
	106011460105	HS2													936	864			
Máquina 6	106003710103	HS1		1224	1224	925													
	106339860103	HS16				925	1224												
	106339860103	HS16						925	1224										
	106003710103	HS1							1224	925	1224								
	106339860103	HS16										1224			925				
	106003710103	HS1															1224		
Máquina 7	106164910104	HS12		1584	1584	1272	1584	1272											
	106164910104	HS12										1272	1584	1584					
	106320590102	HS15															1416		
	106011480105	HS3																2880	
Máquina 8	106011520103	HS5	1156																
	106037710104	HS10		1152	1152	925													
	106320590102	HS15					1416												
	106011520103	HS5						1440	1156										
	106011520103	HS5										1440							
	106037710104	HS10											1152		1152				
	106011520103	HS5															1440		
Máquina 9	106386430104	HS19					1080	867			1080							1080	
Máquina 10	106395280103	HS20		1440															
	106011480105	HS3					2880												
	106377090102	HS18							924	1152									
	106395280103	HS20															1440		
	106377090102	HS18																1152	
Máquina 11	106247660105	HS13		540	540	434	540	540											
	106247660105	HS13							434	540	540								
	106247660105	HS13										434	540	540					
	106247660105	HS13														540	540		
Máquina 12	106247670104	HS14				576	576	462	576	576	462	576	576	462	576	576	462	576	576
Total			2312	13428	10548	6099	16497	14556	8467	5868	2340	5636	12492	11124	1550	13033	16619		
Alterações de turno de Produção																			
Alterações de centro de produção e de turno se necessário																			

Figura 15 - Alterações de produções provocadas pela falta de capacidade de máquina

- c. Extrai-se do SAP (comando CM01 - capacidades) o número de horas de trabalho necessárias para produzir as produções planeadas no SAP;

Divide-se esse número de horas por 7,2 (7,2h = 1 operador), para ter o número total de operadores necessários para a produção semanal;

Distribuem-se os operadores pelos 3 turnos de produção, seguindo uma orientação de nivelamento do número de operadores nos turnos ao longo da semana (Figura 16).

Centro Trabalho	Nº SAP	Descrição	Dia 1			Dia 2			Dia 3			Dia 4			Dia 5			
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Máquina 1	106011540103	HS6		4	4		4	4	4				4	4	4			
	106011540103	HS6																
	106011540103	HS6																
Máquina 2	106037720103	HS11				4			4			4					4	4
Máquina 3	106373180102	HS17	2	2			2		2			2						
Máquina 4	106011500102	HS4		3														
	106011560104	HS7			3													
	106012650103	HS8				7	7											
	106012650103	HS8										7						
	106011500102	HS4														3		3
Máquina 5	106012680104	HS9				6												
	106011460105	HS2					6											
	106011460105	HS2							6									
	106012680104	HS9												6		6	6	
Máquina 6	106003710103	HS1		6	6	6												
	106339860103	HS16				6	6	6										
	106339860103	HS16							6	6								
	106003710103	HS1								6	6	6				6		6
	106339860103	HS16											6					6
Máquina 7	106164910104	HS12		3	3	3	3	3										
	106164910104	HS12										3	3	3				
	106320590102	HS15														2		
	106011480105	HS3																2
Máquina 8	106011520103	HS5	4															
	106037710104	HS10		2	2	2												
	106320590102	HS15					2											
	106011520103	HS5						4	4									
	106011520103	HS5										4						
	106037710104	HS10											2		2			
Máquina 9	106011520103	HS5																4
	106386430104	HS19					4	4				4						4
Máquina 10	106395280103	HS20		3														
	106011480105	HS3					2											
	106377090102	HS18							2	2								
	106395280103	HS20														3		
	106377090102	HS18																2
Máquina 11	106247660105	HS13		6	6	6	6	6										
	106247660105	HS13							6	6	6							
	106247660105	HS13										6	6	6				
	106247660105	HS13														6	6	
Máquina 12	106247670104	HS14				6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Total	Operadores necessários		6	29	24	21	46	48	34	30	18	25	39	34	12	38	47	
	Operadores disponíveis		15	45	30	15	45	30	15	45	30	15	45	30	15	45	30	
	Diferença Operadores		9	16	6	-6	-1	-18	-19	15	12	-10	6	-4	3	7	-17	

Figura 16 - Verificação das necessidades de operadores após alterações anteriores

d. Alocação dos operadores ao longo da semana pelos centros de trabalho, tendo em conta o número de operadores disponíveis por turno (Figura 17).

Centro Trabalho	Nº SAP	Descrição	Dia 1			Dia 2			Dia 3			Dia 4			Dia 5		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Máquina 1	106011540103	HS6		4	4	4	4	4	4								
	106011540103	HS6									4	4	4				
	106011540103	HS6												4	4		
Máquina 2	106037720103	HS11				4			4			4				4	
Máquina 3	106373180102	HS17	2	2			2		2			2					
Máquina 4	106011500102	HS4		3													
	106011560104	HS7			3												
	106012650103	HS8				7	7										
	106012650103	HS8									7						
	106011560104	HS7										3					
Máquina 5	106012680104	HS9		6			6										
	106011460105	HS2							6								
	106011460105	HS2								6							
	106012680104	HS9									6						
	106011460105	HS2													6	6	
Máquina 6	106003710103	HS1		6	6	6											
	106339860103	HS16				6	6										
	106339860103	HS16						6	6								
	106003710103	HS1							6		6	6					
	106339860103	HS16								6		6	6		6	6	
Máquina 7	106003710103	HS1								6							6
	106164910104	HS12	3	3	3	3	3										
	106164910104	HS12							3			3	3				
	106320590102	HS15														2	
Máquina 8	106011480105	HS3															2
	106011520103	HS5	4														
	106037710104	HS10		2	2	2											
	106320590102	HS15				2											
	106011520103	HS5					4			4							
	106011520103	HS5									4						
Máquina 9	106037710104	HS10										2				2	
	106011520103	HS5															4
Máquina 10	106386430104	HS19		4						4			4			4	
	106395280103	HS20		3													
	106011480105	HS3				2											
	106377090102	HS18							2	2							
	106395280103	HS20										3					
Máquina 11	106377090102	HS18														2	
	106247660105	HS13	6	6	6		6	6									
	106247660105	HS13							6	6	6						
	106247660105	HS13										6	6	6			
Máquina 12	106247660105	HS13														6	6
	106247670104	HS14		6	6		6			6	6	6	6	6	6	6	6
Total	Operadores necessários		15	45	30	15	46	29	16	45	28	16	45	30	16	45	30
	Operadores disponíveis		15	45	30	15	45	30	15	45	30	15	45	30	15	45	30
	Diferença Operadores		0	0	0	0	-1	1	-1	0	2	-1	0	0	-1	0	0
	Dia		0			0			1			-1			-1		

Figura 17 - Alterações de produções provocadas pela falta de capacidade de operadores

e. Finalização do plano final de produção (Figura 18), convertendo a alocação de operadores pela quantidade de peças a produzir.

Centro Trabalho	Nº SAP	Descrição	Dia 1			Dia 2			Dia 3			Dia 4			Dia 5		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Máquina 1	106011540103	HS6		3168	3168	2543	3168	3168		2543							
	106011540103	HS6										2543	3168	3168			
	106011540103	HS6													2543	3168	
Máquina 2	106037720103	HS11				1440			1440			1440					1440
Máquina 3	106373180102	HS17	1156	1440			1440		1156			1440					
Máquina 4	106011500102	HS4		2880													
	106011560104	HS7			2880												
	106012650103	HS8				2880	2880										
	106012650103	HS8									2880						
	106011560104	HS7										2880					
Máquina 5	106012680104	HS9		1088													
	106011460105	HS2				936											
	106011460105	HS2							936								
	106012680104	HS9								1088							
	106011460105	HS2													936	864	
Máquina 6	106003710103	HS1		1224	1224	925											
	106339860103	HS16				925	1224										
	106339860103	HS16						925	1224								
	106003710103	HS1							1224		1224	925			925	1224	
	106339860103	HS16															1224
Máquina 7	106164910104	HS12	1272	1584	1584	1272	1584										
	106164910104	HS12							1272								
	106320590102	HS15									1584	1584					
	106011480105	HS3														1416	
																	2880
Máquina 8	106011520103	HS5	1156														
	106037710104	HS10		1152	1152	925											
	106320590102	HS15					1416										
	106011520103	HS5						1440		1156							
	106011520103	HS5									1440						
	106037710104	HS10											1152		1152		1440
Máquina 9	106386430104	HS19		1080					867		1080				1080		
Máquina 10	106395280103	HS20		1440													
	106011480105	HS3				2880											
	106377090102	HS18							924	1152							
	106395280103	HS20									1440						
	106377090102	HS18														1152	
Máquina 11	106247660105	HS13	434	540	540		540	540									
	106247660105	HS13							434	540	540						
	106247660105	HS13										434	540	540			
	106247660105	HS13													540	540	
Máquina 12	106247670104	HS14		576	462		576			576	576	462	576	576	462	576	576
Total			4018	16172	11010	5665	16345	10692	3439	11706	4868	3439	15372	10825	3930	15564	7524

Figura 18 - Cenário real do plano final de produção

5. Por fim, de acordo com o plano final de produção, as ordens de produção são inseridas e firmadas no SAP, tendo em conta o escalonamento ao longo da semana e respetivos centros de trabalho.

Todas essas etapas são executadas manualmente recorrendo ao *software* Excel. Esse processo manual de construção do plano final de produção, demora aproximadamente um dia de trabalho. A complexidade e a importância dessas decisões exigem uma ferramenta mais sofisticada que receba todas as informações sobre o processo, nomeadamente as previsões, os níveis de *stock* e o plano de entrega, e produza um plano de produção preciso e rigoroso. Atualmente, existem diversas soluções no mercado, mas são dispendiosas e nem sempre conseguem ser direcionadas para este caso concreto. Desenvolver essa ferramenta seria um passo importante para a empresa, a fim de reduzir os

tempos de desenvolvimento do plano de produção (processo manual demorado e sujeito a erro humano), maximizar a produção e reduzir o número de trocas de ferramenta.

O plano de entrega semanal é o arquivo de informações mais importante trocado entre a fábrica e o cliente. Esse plano inclui informações sobre as quantidades necessárias, datas de vencimento (datas de entrega) e *níveis de stock*. Esses *stocks* podem ser alterados a cada semana, resultando em novos níveis de *stock* para as semanas seguintes.

Um plano de produção eficaz é crucial para o sucesso da Autoneum Setúbal no cumprimento de todos os seus pedidos de cliente, o que economizaria tempo e recursos da Autoneum Setúbal. Portanto, ter um modelo confiável de programação de produção para ajudar o responsável de planeamento nas decisões necessárias é um passo importante para as operações da Autoneum Setúbal.

4.2. Definição do Modelo

Com o objetivo de desenvolver uma ferramenta que auxilie a gestão e administração da fábrica na etapa de planeamento da produção, nomeadamente o processo de tomada de decisão no que diz respeito ao plano de produção, foi formulado um modelo de programação linear inteira mista (PLIM).

Com o objetivo de aproximar o mais possível o modelo da realidade houve necessidade, como é usual neste tipo de situação, de assumir alguns pressupostos referentes ao processo produtivo. Os pressupostos considerados (alguns já foram expostos ao longo do trabalho) podem resumir-se como se segue:

- O processo de produção é de estágio único;
- Cada centro de trabalho m só pode produzir um tipo de produto i de cada vez, ou seja, não há produção de produtos em simultâneo numa mesma máquina;
- Cada produto i está habilitado a ser produzido num conjunto de máquinas;
- Os tempos de processamento p_i dependem só do produto i (e não da máquina onde é produzido);
- Para cada produto i são conhecidas as datas de entrega e a procura (determinística, dinâmica e independente);
- A data pretendida para a conclusão da produção do produto i é no dia anterior ao pedido de entrega;
- Os recursos necessários ao processo produtivo estão sempre disponíveis, o que faz com que o processo possa ser iniciado assim que recebido o pedido de encomenda;
- O número de operários disponíveis para o turno t do dia k (OP_{kt}) é definido previamente;
- As capacidades de produção estão definidas no cálculo do tempo disponível de produção de cada turno t (o turno 1 tem uma limitação de 5,78 horas e os turnos 2 e 3 de 7,2 horas) e o tempo de processamento unitário (p_i) para cada produto i ;

- Não são definidas quantidades mínimas e máximas de *stock* do produto i ;
- A estrutura de *setup* é de tipo complexa, com tempos e custos de *setup* dependentes da sequência;
- Não há trocas de produção durante um turno. Apesar de ser possível, não é prática corrente da empresa e, deste modo, o modelo fica consideravelmente mais simplificado. Este pressuposto garante que em cada turno não é efetuada mais que uma troca de ferramenta por máquina, sendo definido a troca de ferramenta como o processo de desmontagem de uma ferramenta da máquina em que se encontrava a produzir e a respetiva montagem da ferramenta seguinte;
- O tempo de *setup* da máquina m para produzir o produto i quando anteriormente foi produzido um produto $j \neq i$ nessa mesma máquina é 30 minutos. O custo de *setup* da máquina m para produzir o produto i (s_{im}) é dado pela quantidade de produto não produzida devido ao tempo de troca;

Tendo em conta os pressupostos assumidos e as especificidades do problema em estudo, nenhum dos modelos revistos na literatura é adequado ao caso de estudo apresentado. Como tal, houve necessidade de desenvolver um novo modelo tendo como base as partes dos modelos revistos na literatura. Refira-se ainda a utilidade e o interesse que o modelo desenvolvido poderá revelar para outros problemas reais de dimensionamento de lotes e escalonamento do tipo FJS-SDST com os mesmos pressupostos aqui expostos, em particular, no que diz respeito à troca de ferramentas.

4.2.1. Conjuntos

$I = \{1, \dots, N\}$ – conjunto dos produtos, em que N é o número de produtos;

$M_i = \{1, \dots, C_i\}$ – conjunto das máquinas habilitadas a produzir o produto i , em que C_i é o número de máquinas habilitadas;

$K = \{1, \dots, D\}$ – conjunto dos dias a planear, em que D é o número de dias a planear;

$T = \{1, 2, 3\}$ – conjunto dos turnos de produção.

4.2.2. Parâmetros

N – número de produtos

C_i – número de máquinas que produzem o produto i

D – número de dias a planear

N_{ik} - necessidades do produto i para o dia k

O_i - número de operários necessários para a produção do produto i

OP_{kt} - número de operários disponíveis no turno t do dia k

p_i - tempo de processamento do produto i (em horas)

P_1 – tempo de trabalho do turno 1 (em horas)

P_2 – tempo de trabalho dos turnos 2 e 3 (em horas)

M_{it} – capacidade máxima de produção do produto i no turno t

s_{im} - custo de *setup* do produto i na máquina m

ST_{i0} - quantidade do produto i em *stock* no início da produção

F_{im0} – assume o valor 1 se a máquina m está preparada para produzir o produto i no início da produção e 0 caso contrário

4.2.3. Variáveis

X_{imkt} - quantidade de produto i a produzir na máquina m no turno t do dia k

ST_{ik} - quantidade do produto i em *stock* no final do dia k

Z_{imkt} - variável binária que assume o valor 1 se o produto i for processado na máquina m no turno t do dia k , e 0 caso contrário

F_{imkt} – variável que assume o valor 1 se a máquina m está preparada para produzir o produto i no final do turno t do dia k e 0 caso contrário

Y_{imkt} - variável que assume o valor 1 se há tempos de *setup* na produção do produto i na máquina m no turno t do dia k e 0 caso contrário

4.2.4. Funções Objetivo

Tendo em conta as características do problema, irão ser definidas, em seguida, algumas funções objetivo a serem aplicadas individualmente no modelo de otimização.

FUNÇÃO OBJETIVO DE MAXIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO (FO1)

$$\max Z_{FO1} = \sum_{i \in I} \sum_{m \in M_i} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} X_{imkt} \quad (1)$$

A função objetivo (1) maximiza o total da produção.

FUNÇÃO OBJETIVO DE MAXIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO COM PENALIZAÇÃO DA TROCA DE FERRAMENTAS ATRAVÉS DO TEMPO NÃO PRODUTIVO (FO2)

$$\max Z_{FO2} = \sum_{i \in I} \sum_{m \in M_i} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} X_{imkt} - \sum_{i \in I} \sum_{m \in M_i} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} s_{im} Y_{imkt} \quad (2)$$

A função objetivo (2) maximiza o total da produção, mas penalizando a troca de ferramentas através do tempo não produtivo. A penalização é feita através de um custo de *setup* (s_{im}) que representa a quantidade de produto i que seria produzida na máquina m no tempo de troca (30 minutos).

FUNÇÃO OBJETIVO DE MINIMIZAÇÃO DA TROCA DE FERRAMENTAS (FO3)

$$\min Z_{FO3} = \sum_{i \in I} \sum_{m \in M_i} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} Y_{imkt} \quad (3)$$

A função objetivo (3) minimiza o total da troca de ferramentas.

FUNÇÃO OBJETIVO DE MINIMIZAÇÃO DA TROCA DE FERRAMENTAS ATRAVÉS DO TEMPO NÃO PRODUTIVO (FO4)

$$\min Z_{FO4} = \sum_{i \in I} \sum_{m \in M_i} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} s_{im} Y_{imkt} \quad (4)$$

A função objetivo (4) minimiza o total da troca de ferramentas através do tempo não produtivo, ou seja, através de um custo de *setup* (s_{im}) que representa a quantidade de produto i que seria produzida na máquina m no tempo de troca (30 minutos).

FUNÇÃO OBJETIVO DE MINIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE OPERÁRIOS COM PENALIZAÇÃO DA TROCA DE FERRAMENTAS (FO5)

$$\min Z_{FO5} = \sum_{i \in I} \sum_{m \in M_i} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} O_i Z_{imkt} + \sum_{i \in I} \sum_{m \in M_i} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} Y_{imkt} \quad (5)$$

A função objetivo (5) minimiza o total do número de operários, mas penalizando a troca de ferramentas.

FUNÇÃO OBJETIVO DE MINIMIZAÇÃO DO TEMPO TOTAL DE PROCESSAMENTO DAS MÁQUINAS COM PENALIZAÇÃO DA TROCA DE FERRAMENTAS (FO6)

$$\min Z_{FO6} = \sum_{i \in I} \sum_{m \in M_i} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} p_i X_{imkt} + \sum_{i \in I} \sum_{m \in M_i} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} Y_{imkt} \quad (6)$$

A função objetivo (6) minimiza o total do tempo de processamento das máquinas, mas penalizando a troca de ferramentas.

4.2.5. Restrições

Após a definição das funções objetivo a serem aplicadas no modelo, serão definidas as restrições a que o modelo está sujeito.

$$\sum_{m \in M_i} Z_{imkt} \leq 1 \quad , \quad i \in I, k \in K, t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{i \in I} Z_{imkt} \leq 1 \quad , \quad m \in M_i, k \in K, t \in T \quad (8)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in M_i} O_i Z_{imkt} \leq OP_{kt} \quad , \quad k \in K, t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{i \in I} p_i X_{imk1} \leq P_1 \quad , \quad m \in M_i, k \in K \quad (10)$$

$$\sum_{i \in I} p_i X_{imkt} \leq P_2 \quad , \quad m \in M_i, k \in K, t = 2,3 \quad (11)$$

$$X_{imkt} \leq M_{it} * Z_{imkt} \quad , \quad i \in I, m \in M_i, k \in K, t \in T \quad (12)$$

$$ST_{ik} = \sum_{m \in M_i} \sum_{t \in T} X_{imkt} + ST_{i(k-1)} - N_{ik} \quad , \quad i \in I, k \in K \quad (13)$$

$$ST_{ik} \geq N_{i(k+1)} \quad , \quad i \in I, k \in K \quad (14)$$

$$\sum_{i \in I} F_{imkt} \leq 1 \quad , \quad m \in M_i, k \in K, t \in T \quad (15)$$

$$\sum_{m \in M_i} F_{imkt} \leq 1 \quad , \quad i \in I, k \in K, t \in T \quad (16)$$

$$F_{imkt} \geq Z_{imkt} \quad , \quad i \in I, m \in M_i, k \in K, t \in T \quad (17)$$

$$F_{imk1} \leq F_{im(k-1)3} + \left(\sum_{j \in I} Z_{jmk1} + \sum_{n \in M_i} Z_{ink1} \right), \quad i \in I, m \in M_i, k \in K \quad (18)$$

$$F_{imkt} \leq F_{imk(t-1)} + \left(\sum_{j \in I} Z_{jmkt} + \sum_{n \in M_i} Z_{inkt} \right), \quad i \in I, m \in M_i, k \in K, t = 2,3 \quad (19)$$

$$F_{imk1} \geq F_{im(k-1)3} - \left(\sum_{j \in I} Z_{jmk1} + \sum_{n \in M_i} Z_{ink1} \right), \quad i \in I, m \in M_i, k \in K \quad (20)$$

$$F_{imkt} \geq F_{imk(t-1)} - \left(\sum_{j \in I} Z_{jmkt} + \sum_{n \in M_i} Z_{inkt} \right), \quad i \in I, m \in M_i, k \in K, t = 2,3 \quad (21)$$

$$Y_{imk1} \geq Z_{imk1} - F_{im(k-1)3}, \quad i \in I, m \in M_i, k \in K \quad (22)$$

$$Y_{imkt} \geq Z_{imkt} - F_{imk(t-1)}, \quad i \in I, m \in M_i, k \in K, t = 2,3 \quad (23)$$

$$Z_{imkt} \in \{0, 1\}, \quad i \in I, m \in M_i, k \in K, t \in T \quad (24)$$

$$X_{imkt} \geq 0 \text{ e inteiros}, \quad i \in I, m \in M_i, k \in K, t \in T \quad (25)$$

$$F_{imkt}, Y_{imkt} \geq 0, \quad i \in I, m \in M_i, k \in K, t \in T \quad (26)$$

As restrições (7) asseguram que no turno t do dia k , um produto i só pode ser produzido numa máquina m habilitada a produzir esse produto.

As restrições (8) asseguram que no turno t do dia k , uma máquina m só pode produzir um único tipo de produto.

As restrições (9) asseguram que o número de operários disponíveis no turno t do dia k não é excedido.

As restrições (10) e (11) asseguram que a capacidade de produção de uma máquina m no turno t do dia k não é excedida.

As restrições (12) asseguram que se o tipo de produto i for processado na máquina m no turno t do dia k então a quantidade a produzir não pode ser superior à capacidade máxima de produção desse produto nesse turno. Se não for processado então não pode haver produção.

As restrições (13) e (14) asseguram que a quantidade do produto i em stock no final do dia k não pode ser inferior à necessidade do dia $k+1$ seguinte.

As restrições (15) asseguram que no turno t do dia k , uma máquina m só pode estar preparada para produzir um único tipo de produto i .

As restrições (16) asseguram que no turno t do dia k , o tipo de produto i só pode estar apto a produzir numa máquina m habilitada a produzir esse produto.

As restrições (17) asseguram que se o tipo de produto i for processado na máquina m no turno t do dia k então no final desse turno essa máquina fica preparada para continuar a produzir esse tipo de produto.

As restrições (18) e (19) asseguram que se a máquina m não estava preparada para produzir o tipo de produto i no turno anterior ao turno t (mesmo dia ou dia anterior) do dia k e não houve produção desse produto i noutra máquina nem processamento doutro tipo de produto na máquina m então essa máquina continua a não estar preparada para produzir esse tipo de produto.

As restrições (20) e (21) asseguram que se a máquina m estava preparada para produzir o tipo de produto i no turno anterior ao turno t (mesmo dia ou dia anterior) do dia k e não houve produção desse produto noutra máquina nem processamento doutro tipo de produto nessa máquina m então

essa máquina continua a estar preparada para produzir esse tipo de produto.

As restrições (22) e (23) asseguram que se o tipo de produto i for processado na máquina m no turno t do dia k e essa máquina não estava preparada para produzir esse tipo de produto então há uma troca de ferramentas, ou seja, um tempo de *setup*.

Note-se que as restrições (15) a (23) só têm interesse se se pretender considerar tempos de *setup*.

Nas restrições (24), (25) e (26) define-se o domínio de variação das variáveis. Apesar das variáveis Y_{imkt} e F_{imkt} serem não negativas, se forem minimizadas na função objetivo, apenas vão tomar os valores 0 ou 1 pela forma como estão definidas.

4.3. Resolução do Estudo de Caso

O modelo desenvolvido será agora aplicado ao caso de estudo exposto na Subseção 4.1 que, tal como vimos, corresponde a um cenário real do plano de produção (Figura 18) e respetivas necessidades de operários (Figura 17).

Para que seja possível verificar, compreender e comparar os resultados numéricos obtidos, estes serão analisados através dos seguintes indicadores: total da produção, total de produtos não produzidos por troca de ferramentas, total de número de operadores, total de trocas de ferramenta, diferença entre o total de produção e o total de produtos não produzidos por troca de máquina, total de tempo de processamento e, por fim, o tempo para a obtenção da solução.

Quanto ao total de troca de ferramentas veja-se o seguinte gráfico (Gráfico 1), onde podemos observar o número de trocas de ferramenta semanal ao longo deste ano 2019 na Autoneum Setúbal:

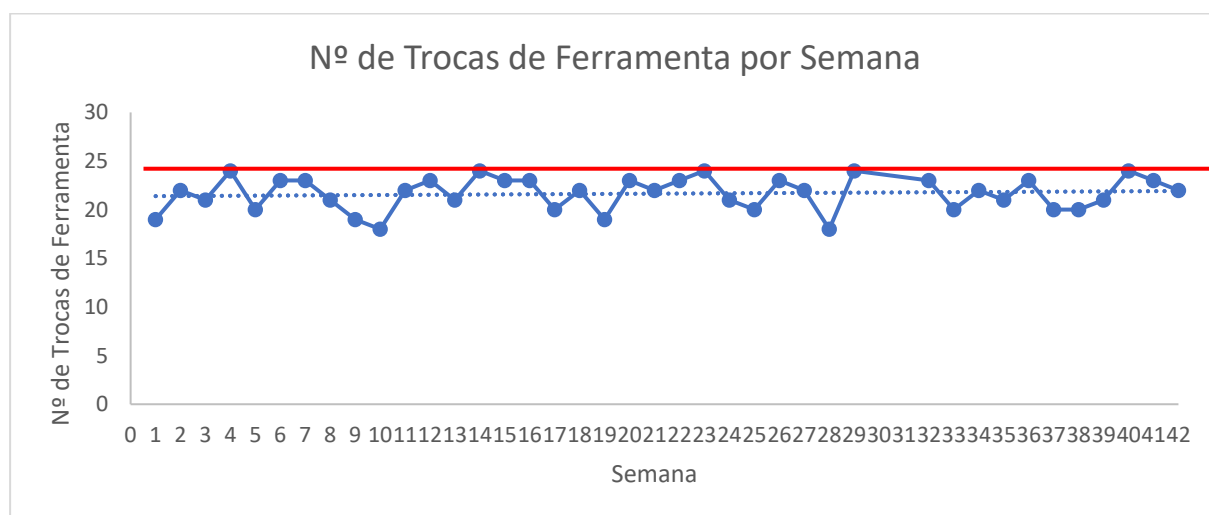


Gráfico 1 – Número de trocas de ferramentas em 2019 na Autoneum Setúbal

Através deste gráfico, podemos considerar que 24 seria o número máximo de troca de ferramentas admissível numa semana laboral.

Na tabela seguinte (Tabela 4), analisamos os indicadores referidos anteriormente relativos ao cenário real do plano de produção, e doravante designado Plano Autoneum.

Tabela 4 - Resultados do Plano Autoneum

Resultados	Autoneum
Total da produção	140569
Total de produtos não produzidos por troca de ferramentas	2595
Total de número de operários	451
Total de trocas de ferramentas	22
Total da produção - Total de produtos não produzidos por troca de máquinas	137974
Total de tempo de processamento (horas)	686,324
Tempo de elaboração do plano (segundos)	25920

Como podemos verificar na Tabela 4, o plano resultou num total de produção 140569 peças, 2595 peças não produzidas devido a troca de ferramentas, necessidade de 451 operários e 22 trocas de ferramenta. A diferença entre o total da produção e o total de produtos não produzidos devido à troca de ferramentas foi de 137974 peças, o tempo total de processamento foi de 686,324 horas e, tal como já foi referido anteriormente, o tempo necessário para a elaboração manual de um plano semanal é de aproximadamente um dia (7,2h = 25920s).

Podemos também salientar que os pressupostos referentes ao processo produtivo (mencionados na subsecção 4.2) foram todos cumpridos, em particular:

- As produções não se sobrepõem na mesma máquina.
- O número de operários disponíveis não é excedido.
- A capacidade de produção não é excedida.
- O *stock* de cada produto num determinado dia é igual ou superior à necessidade do dia seguinte.

Com 22 trocas de ferramenta, o plano Autoneum respeita o limiar máximo admissível para o número de trocas de ferramenta.

Para a obtenção de soluções do modelo PLIM desenvolvido, o mesmo foi implementado recorrendo ao Excel. Esta escolha deveu-se ao facto de o planeador da empresa já se sentir familiarizado com este *software* e, naturalmente, tornar mais fácil a integração do modelo nas suas rotinas diárias de trabalho. Qualquer outra escolha levaria a uma resistência natural ao seu uso. No entanto, a ferramenta *solver* do Excel, que permite resolver problemas de PL, tem uma grande limitação no que diz respeito à dimensão dos problemas que é capaz de resolver. Atualmente, o *solver* apenas permite resolver problemas com um número máximo de 200 variáveis e 100 restrições funcionais. O modelo implementado, para este cenário real, tem 3060 variáveis e 79510 restrições funcionais.

No entanto, existem alternativas ao *solver* do Excel. Neste trabalho, foi utilizado o OpenSolver (Mason, 2012) que é um suplemento VBA do Excel, gratuito e de código aberto, que estende a ferramenta *solver* do Excel com outros *solvers* mais potentes. Como *solver* do OpenSolver foi utilizado o Gurobi Optimizer (Gurobi Optimizer Software, 2019), comercial, mas gratuito para fins académicos.

Um fator importante a ter em conta ao resolver o modelo é o tempo de computação para a resolução dos resultados obtidos. Os modelos foram executados num computador portátil com um processador Intel Core i5 2.60-2.71 GHz e 8GB de RAM. O tempo de execução foi limitado em todos os modelos, tendo-se definido como critérios de paragem uma hora ou uma tolerância de pesquisa em

árvore de 1%.

PLANO DE PRODUÇÃO – MODELO PLIM COM FUNÇÃO OBJETIVO DE MAXIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO (MFO1)

A Figura 19 apresenta parte da solução obtida, em termos de dimensionamento dos lotes e do escalonamento, para o modelo PLIM com função objetivo de maximização da produção (plano MFO1), tendo-se obtido um valor da função objetivo igual a 157096 peças produzidas (o plano MFO1 completo encontra-se no Anexo 1).

Na Tabela 5 seguinte, observamos os indicadores relativos ao plano MFO1, em que se destaca o indicador relativo ao tempo de execução pelo *solver* que foi de 10 segundos. Note-se que para obter os diversos indicadores, foi resolvido o modelo completo tal como foi apresentado, isto é, com as restrições (15) a (23) apesar de não serem necessárias para esta função objetivo. Refira-se que sem essas restrições a solução foi obtida em 5 segundos.

Tabela 5 - Resultados do plano MFO1

Resultados - Plano MFO1	
Total da produção	157096
Total de produtos não produzidos por troca de ferramentas	7310
Total de número de operários	450
Total de trocas de ferramentas	60
Total da produção - Total de produtos não produzidos por troca de máquinas	149786
Total de tempo de processamento (horas)	725,961
Tempo de resolução do modelo (segundos)	10

Como podemos verificar na Tabela 5, esta solução resultou num total de produção de 157096 peças, 7310 peças não produzidas devido a troca de ferramentas, necessidade de 450 operários, 60 trocas de ferramenta, a diferença entre o total da produção e o total de produtos não produzidos por troca de ferramentas foi de 149786 peças e o tempo total de processamento foi 725,961 horas. Podemos também verificar que os pressupostos foram todos cumpridos.

Analisando a solução do modelo MFO1, podemos verificar que se trata de um plano um pouco irrealista do ponto de vista funcional da realidade atual da fábrica, uma vez que não tem em conta a troca de ferramentas. Por exemplo, tem-se produções a começar no turno 1 numa determinada máquina, no turno 2 produz numa máquina diferente e no turno 3 volta à máquina inicial. Ou seja, neste exemplo, são contabilizadas duas trocas de ferramenta, que são traduzidas em 60 minutos (30min + 30 min) não produtivos. O grande inconveniente do modelo MFO1 é não ter em conta o tempo das trocas de ferramenta, o que provoca desfasamento das quantidades totais produzidas no modelo para o que se produziria na realidade.

Com 60 trocas de ferramenta, o plano não respeita o limiar máximo admissível para o número de trocas de ferramenta, e, conseqüentemente, não será um plano válido para implementação na fábrica.

PLANO DE PRODUÇÃO - MODELO PLIM COM FUNÇÃO OBJETIVO DE MAXIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO COM PENALIZAÇÃO DA TROCA DE FERRAMENTAS ATRAVÉS DO TEMPO NÃO PRODUTIVO (MFO2)

A Figura 20 apresenta parte da solução obtida para o modelo PLIM com função objetivo de maximização da produção com penalização da troca de ferramentas através do tempo não produtivo (plano MFO2), tendo-se obtido um valor da função objetivo igual a 154530 (o plano MFO2 completo encontra-se no Anexo 2).

Na Tabela 6 seguinte, observamos os indicadores relativos ao plano MFO2:

Tabela 6 - Resultado do plano MFO2

Resultados - Plano MFO2	
Total da produção	156968
Total de produtos não produzidos por troca de ferramentas	2438
Total de número de operários	450
Total de trocas de ferramentas	20
Total da produção - Total de produtos não produzidos por troca de máquinas	154530
Total de tempo de processamento (horas)	725,9625
Tempo de resolução do modelo (segundos)	509

Como podemos verificar na Tabela 6, esta solução resultou num total de produção 156968 peças, 2438 peças não produzidas devido a troca de ferramentas, necessidade de 450 operários, 20 trocas de ferramentas, a diferença entre o total da produção e o total de produtos não produzidos devido a troca de ferramentas foi de 154530 peças e o tempo total de processamento foi 725,9625 horas. Podemos também verificar que os pressupostos foram todos cumpridos.

Analisando a solução do modelo MFO2, podemos concluir que ao ter em conta os custos dos tempos não produtivos, o plano já apresenta consideravelmente menos trocas de ferramentas. Este modelo dá-nos um plano mais realista do ponto de vista funcional da realidade atual da fábrica, uma vez que apresenta um número de troca de ferramentas muito próximo ao praticado usualmente na fábrica. Com 20 trocas de ferramentas, o plano MFO2 respeita o limiar máximo admissível para o número de trocas de ferramenta, e, conseqüentemente, será um plano válido para implementação na fábrica.

PLANO DE PRODUÇÃO - MODELO PLIM COM FUNÇÃO OBJETIVO DE MINIMIZAÇÃO DA TROCA DE FERRAMENTAS (MFO3)

A Figura 21 apresenta parte da solução obtida para o modelo PLIM com função objetivo de minimização da troca de ferramentas (plano MFO3), tendo-se obtido um valor da função objetivo igual a 17 (o plano MFO3 completo encontra-se no Anexo 3).

Na Tabela 7 observamos os indicadores relativos ao plano MFO3:

Tabela 7 - Resultados do plano MFO3

Resultados - Plano MFO3	
Total da produção	141029
Total de produtos não produzidos por troca de ferramentas	2144
Total de número de operários	439
Total de trocas de ferramentas	17
Total da produção - Total de produtos não produzidos por troca de máquinas	138885
Total de tempo de processamento (horas)	678,7033
Tempo de resolução do modelo (segundos)	3600

Como podemos verificar na Tabela 7, este plano resultou num total de produção 141029 peças, 2144 peças não produzidas devido a troca de ferramentas, necessidade de 439 operários, 17 trocas de ferramentas, a diferença entre o total da produção e o total de produtos não produzidos devido a troca de ferramentas foi de 138885 peças e o tempo total de processamento foi 678,7033 horas. Podemos também verificar que os pressupostos foram todos cumpridos.

Analisando a solução do modelo MFO3, podemos concluir que ao minimizar a troca de ferramentas, consegue-se uma grande redução ao nível de trocas de ferramentas, obtendo-se apenas 17 trocas, naturalmente, à custa de uma redução na produção, reduzindo o *stock*, mas cumprindo à mesma a satisfação da procura. Destaque-se também a redução de 11 operários deste plano comparativamente aos dois anteriores e de 12 comparativamente ao plano Autoneum. Refira-se ainda que o *solver* interrompeu a pesquisa da solução ótima após uma hora de execução, tendo atingido o critério de paragem definido para o tempo. Desta forma, fica a dúvida se aumentando o tempo de critério de paragem não se conseguiria obter um melhor resultado, para o número de trocas de ferramentas. Veremos mais adiante que sim.

Com 17 trocas de ferramentas, o plano MFO3 respeita o limiar máximo admissível para o número de trocas de ferramenta, e, conseqüentemente, será um plano válido para implementação na fábrica.

PLANO DE PRODUÇÃO - MODELO PLIM COM FUNÇÃO OBJETIVO DE MINIMIZAÇÃO DA TROCA DE FERRAMENTAS ATRAVÉS DO TEMPO NÃO PRODUTIVO (MFO4)

A Figura 22 apresenta parte da solução obtida para o modelo PLIM com função objetivo de minimização da troca de ferramentas através do tempo não produtivo (plano MFO4), tendo-se obtido um valor da função objetivo igual a 2044 (o plano MFO4 completo encontra-se no Anexo 4).

Na Tabela 8 seguinte, observamos os indicadores relativos ao plano MFO4:

Tabela 8 - Resultados do plano MFO4

Resultados - Plano MFO4	
Total da produção	141281
Total de produtos não produzidos por troca de ferramentas	2044
Total de número de operários	442
Total de trocas de ferramentas	17
Total da produção - Total de produtos não produzidos por troca de máquinas	139237
Total de tempo de processamento (horas)	680,9695
Tempo de resolução do modelo (segundos)	3600

Como podemos verificar na Tabela 8, este plano resultou num total de produção 141281 peças, 2044 peças não produzidas devido a troca de ferramentas, necessidade de 442 operários, 17 trocas de ferramentas, a diferença entre o total da produção e o total de produtos não produzidos devido a troca de ferramentas foi de 139237 peças e o tempo total de processamento foi 680,9695 horas. Podemos também verificar que os pressupostos foram todos cumpridos.

Analisando a solução do modelo MFO4, apesar de penalizar o tempo não produtivo ao se minimizar a troca de ferramentas, verificamos que temos resultados muito idênticos ao modelo MFO3. Comparativamente a este último, o plano MFO4 mantém o número de trocas de ferramentas, mas reduz um pouco o total de produtos não produzidos devido a trocas de ferramentas. Também aumenta um pouco o total da produção à custa de um aumento do número de operários e do tempo total de processamento das máquinas. Mais uma vez, o critério de paragem do tempo foi alcançado.

Com 17 trocas de ferramenta, o plano MFO4 respeita o limiar máximo admissível para o número de trocas de ferramenta, e, conseqüentemente, será um plano válido para implementação na fábrica.

PLANO DE PRODUÇÃO - MODELO PLIM COM FUNÇÃO OBJETIVO DE MINIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE OPERÁRIOS COM PENALIZAÇÃO DE TROCA DE FERRAMENTAS (MFO5)

A Figura 23 apresenta parte da solução obtida para o modelo PLIM com função objetivo de minimização do número de operários com penalização de troca de ferramentas (MFO5), tendo-se obtido um valor da função objetivo igual a 456 (o plano MFO5 completo encontra-se no Anexo 5).

Na Tabela 9 seguinte, observamos os indicadores relativos ao plano MFO5:

Tabela 9 - Resultados do plano MFO5

Resultados - Plano MFO5	
Total da produção	140786
Total de produtos não produzidos por troca de ferramentas	2044
Total de número de operários	439
Total de trocas de ferramentas	17
Total da produção - Total de produtos não produzidos por troca de máquinas	138742
Total de tempo de processamento (horas)	676,8699
Tempo de resolução do modelo (segundos)	3600

Como podemos verificar na Tabela 9, este plano resultou num total de produção 140786 peças, 2044 peças não produzidas devido a troca de ferramentas, necessidade de 439 operários, 17 trocas de ferramentas, a diferença entre o total da produção e o total de produtos não produzidos devido a troca de ferramentas foi de 138742 peças e o tempo total de processamento foi 676,8699 horas. Podemos também verificar que os pressupostos foram todos cumpridos.

Analisando a solução do modelo MFO5, verificamos que corresponde a uma solução muito semelhante às últimas duas, dos modelos MFO3 e MFO4, com o mesmo número de trocas de ferramentas. O plano MFO5 consegue uma solução que, em termos dos indicadores total de produtos não produzidos devido a troca de ferramentas e total de número de operários, domina as soluções dos planos MFO3 e MFO4, à custa essencialmente de uma redução no total da produção.

Com 17 trocas de ferramenta, o plano MFO5 respeita o limiar máximo admissível para o número de trocas de ferramenta, e, conseqüentemente, será um plano válido para implementação na fábrica.

PLANO DE PRODUÇÃO - MODELO PLIM COM FUNÇÃO OBJETIVO DE MINIMIZAÇÃO DO TEMPO TOTAL DE PROCESSAMENTO DAS MÁQUINAS COM PENALIZAÇÃO DA TROCA DE FERRAMENTAS (MFO6)

A Figura 24 apresenta parte da solução obtida para o modelo PLIM com função objetivo de minimização do tempo total de processamento das máquinas com penalização da troca de ferramentas (MFO6), tendo-se obtido um valor da função objetivo igual a 670,5703 (o plano MFO6 completo encontra-se no Anexo 6).

Na Tabela 10 seguinte, observamos os indicadores relativos ao plano MFO6:

Tabela 10 - Resultados do plano MFO6

Resultados - Plano MFO6	
Total da produção	135521
Total de produtos não produzidos por troca de ferramentas	2070
Total de número de operários	442
Total de trocas de ferramentas	16
Total da produção - Total de produtos não produzidos por troca de máquinas	133451
Total de tempo de processamento (horas)	654,5703
Tempo de resolução do modelo (segundos)	3600

Como podemos verificar na Tabela 10, este plano resultou num total de produção 135521 peças, 5389 peças não produzidas devido a troca de ferramentas, necessidade de 442 operários, 16 trocas de ferramentas, a diferença ente o total da produção e o total de produtos não produzidos devido a troca de ferramentas foi de 133451 peças e o tempo total de processamento foi 654,5703 horas. Podemos também verificar que os pressupostos foram todos cumpridos.

Analisando a solução do modelo MFO6, verificamos que se conseguiu uma clara redução do tempo de processamento das máquinas, como também, curiosamente, se reduziu o número de trocas de ferramentas.

Com 16 trocas de ferramenta, o plano MFO6 respeita o limiar máximo admissível para o número de trocas de ferramenta, e, conseqüentemente, será um plano válido para implementação na fábrica.

Note-se que, com este modelo e com este critério de paragem de 3600 segundos, consegue-se um total de trocas de ferramentas inferior aos modelos onde se minimiza a troca de ferramentas. Refira-se que se voltou a executar o modelo MFO4, aumentando o tempo máximo de corrida de 3600 segundos para 25200 segundos (7 horas) e obteve-se uma solução com o total de troca de ferramentas igual a 16, total de produção 141797, número de operários igual a 439 e total de tempo de processamento igual a 684,98.

4.4. Comparação de Resultados: Plano Autoneum vs Plano Modelo PLIM

Nesta secção comparam-se os vários resultados obtidos entre o Plano Autoneum (no Anexo 7 encontra-se o Plano Autoneum completo no formato dos planos obtidos através do modelo matemático) e as seis variantes do modelo PLIM desenvolvido (MFO1, MFO2, MFO3, MFO4, MFO5 e MFO6). As diferenças entres os vários planos são diversas e devem-se principalmente à variação da utilização dos recursos (humanos e físicos) e dos tempos de produção.

Na Tabela 11 temos resumidamente os resultados do Plano Autoneum e dos planos resolvidos pelo modelo PLIM no que diz respeito aos indicadores utilizados.

Tabela 11 - Resultados dos planos

Resultados	Autoneum	MFO1	MFO2	MFO3	MFO4	MFO5	MFO6
Total da produção	140569	157096	156968	141029	141281	140786	135521
Total de produtos não produzidos por troca de ferramentas	2595	7310	2438	2144	2044	2044	2070
Total de número de operários	451	450	450	439	442	439	442
Total de trocas de ferramentas	22	60	20	17	17	17	16
Total da produção - Total de produtos não produzidos por troca de máquinas	137974	149786	154530	138885	139237	138742	133451
Total de tempo de processamento (horas)	686,3240	725,9610	725,9625	678,7033	680,9695	676,8699	654,5703
Tempo de obtenção do modelo (segundos)	25920	10	509	3600	3600	3600	3600

TOTAL DA PRODUÇÃO

No Gráfico 2 é tido em conta a soma das variáveis X_{imkt} , que, recorde-se, representam a quantidade a produzir do produto i na máquina m no turno t do dia k . Como podemos verificar, os planos MFO1 e MFO2 destacam-se como os planos que nos dão maior produção, o que era expectável uma vez que as suas funções objetivo são de maximização da produção. Contrariamente, o plano MFO6 destaca-se pelo que tem menor produção, o que também era expectável uma vez que a sua função objetivo é de minimização do tempo de processamento das máquinas, produzindo-se apenas o mínimo para satisfazer as encomendas sem criar *stock*. Por fim, verifica-se que os planos MFO3, MFO4 e MFO5 são os que se assemelham mais ao plano Autoneum em termos de produção total.

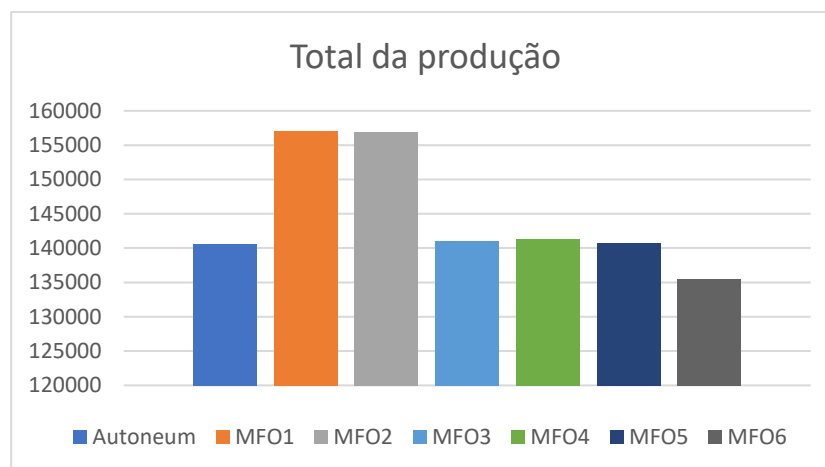


Gráfico 2 – Total da produção

TOTAL DE PRODUTOS NÃO PRODUZIDOS POR TROCA DE FERRAMENTAS

O Gráfico 3 dá-nos o total de produtos não produzidos devido a troca de ferramentas, que é calculado através da soma dos custos de *setup* (s_{im}) multiplicados pelas variáveis Y_{imkt} (1 se há início de produção do produto i na máquina m no turno t do dia k e 0 caso contrário).

Como podemos verificar, o plano MFO1 destaca-se como o plano que menos se aproxima dos valores normais para o plano Autoneum. Esta situação acontece porque a função objetivo FO1 não tem em conta as trocas de ferramentas e, como tal, o tempo não produtivo.

Em termos do indicador aqui analisado, pode-se considerar que os restantes planos se assemelham ao plano Autoneum, apresentando valores ligeiramente melhores.

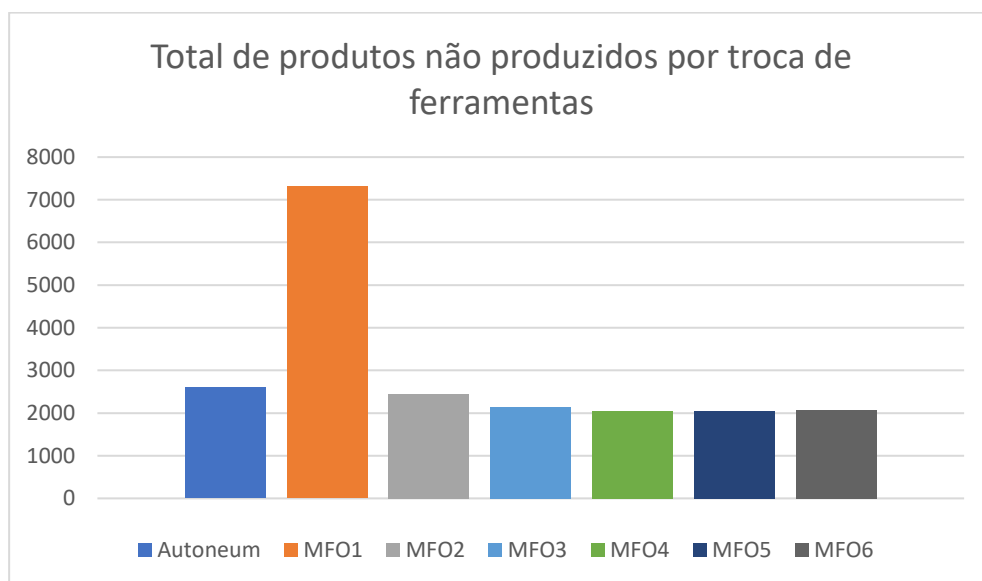


Gráfico 3 - Total de produtos não produzidos por troca de ferramentas

TOTAL DE NÚMERO DE OPERÁRIOS

O Gráfico 4 dá-nos o total de operários necessários para a produção, que é calculado através da soma do número de operários (O_i) multiplicado pelas variáveis Z_{imkt} (1 se o produto i é produzido na máquina m no turno t do dia k e 0 caso contrário).

Como podemos verificar, os planos MFO1 e MFO2 são os planos com valores idênticos ao Plano Autoneum, o que era expectável uma vez que a sua função objetivo de maximização da produção, aumenta as necessidades de operários. O plano elaborado pelo planeador de produção (Plano Autoneum) excede em um operário a limitação máxima do número de operários previamente definida, ou seja, de 450 operários (90 operários x 5 dias). Isso acontece porque, sendo a construção do plano um processo manual, o planeador tem a liberdade de recorrer ao “*stock* de segurança” de operários, ou seja, cada turno tem entre um a dois operários disponíveis (sem tarefas atribuídas). Os restantes planos, ao reduzirem a produção, naturalmente apresentam uma menor necessidade de operários. Os

planos MFO3 e MFO5 destacam-se pelos que têm menor necessidade de operários, o que era expectável, em particular no plano MFO5 uma vez que a função objetivo é de minimização do número de operários. Pode-se questionar porque é que o plano MFO6 não apresenta um número mais reduzido de operários já que se minimiza o tempo de processamento das máquinas. A razão é que, em termos de modelo, o número de operários não depende da quantidade de tempo de processamento, mas da produção ou não de produtos na máquina. Por exemplo, produzir uma unidade de um produto consome o mesmo número de operários que a produção de 100 ou 1000 unidades.

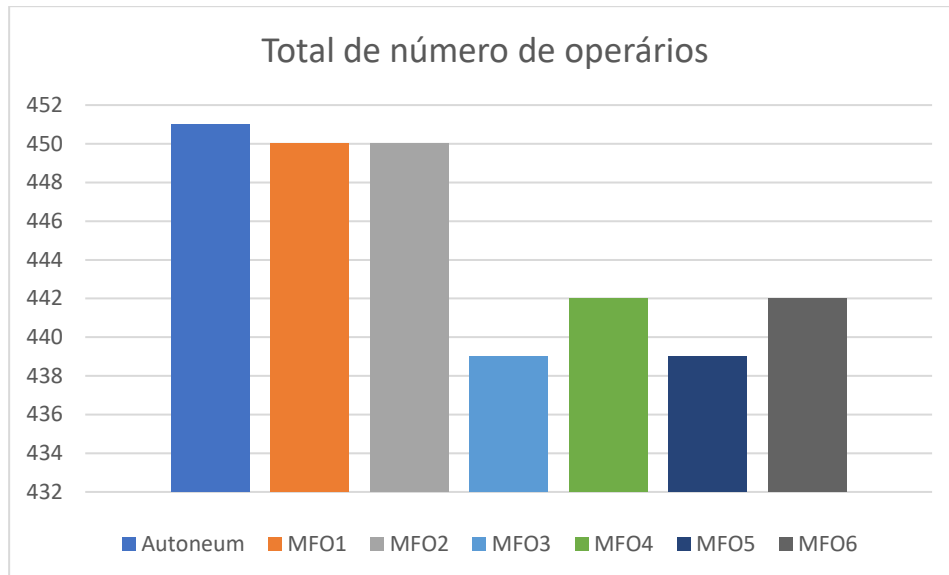


Gráfico 4 – Total de número de operários

TOTAL DE TROCAS DE FERRAMENTA

O Gráfico 5 dá-nos o total de trocas de ferramenta, através da somas das variáveis Y_{imkt} , que são iguais a 1 se há início de produção do produto i na máquina m no turno t do dia k e 0 caso contrário.

Como podemos verificar, o plano MFO1 destaca-se como o plano que menos se aproxima dos valores normais para o plano Autoneum. Esta situação acontece porque o plano não tem em conta as trocas de ferramentas.

Pode-se considerar que os restantes planos se aproximam do plano Autoneum em termos de total de trocas de ferramenta, contudo, destaca-se a clara apresentação de melhores resultados face ao plano Autoneum. Relembre-se que aumentando o tempo de execução do MFO4 conseguiu-se reduzir em uma unidade o número de trocas de ferramentas

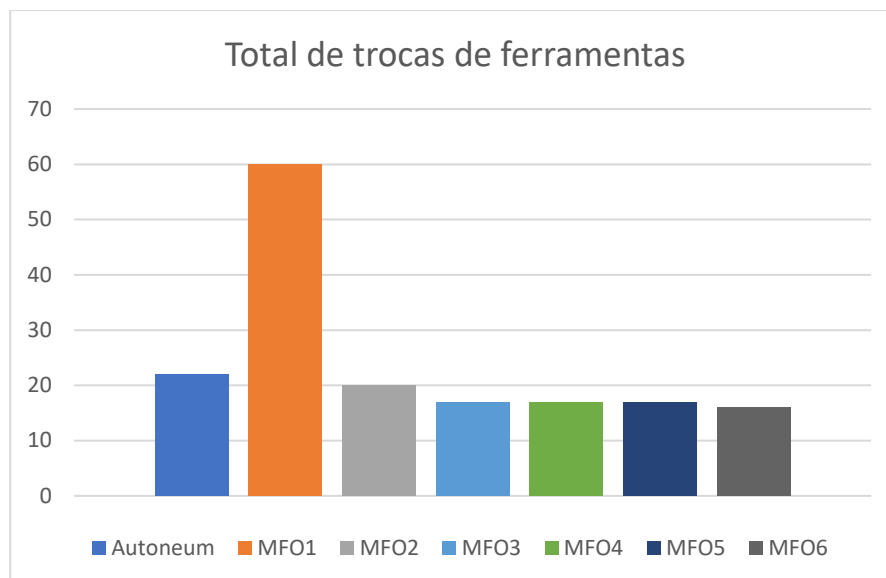


Gráfico 5 - Total de trocas de ferramenta

TOTAL DA PRODUÇÃO – TOTAL DE PRODUTOS NÃO PRODUZIDOS POR TROCA DE FERRAMENTAS

O Gráfico 6 dá-nos a diferença entre o total da produção (soma das variáveis X_{imkt}) e o total de produtos não produzidos devido a troca de ferramentas (soma de $simY_{imkt}$).

Como podemos verificar, os planos MFO1 e MFO2 destacam-se como os planos que nos dão maiores valores, o que era expectável uma vez que as suas funções objetivo são de maximização da produção. Contrariamente, o plano MFO6 destaca-se pelo que tem menor valor, o que também era expectável uma vez que a sua função objetivo é de minimização do tempo de processamento das máquinas, produzindo-se apenas o mínimo para satisfazer as encomendas. Pode-se considerar que os restantes planos se aproximam dos valores do plano Autoneum.

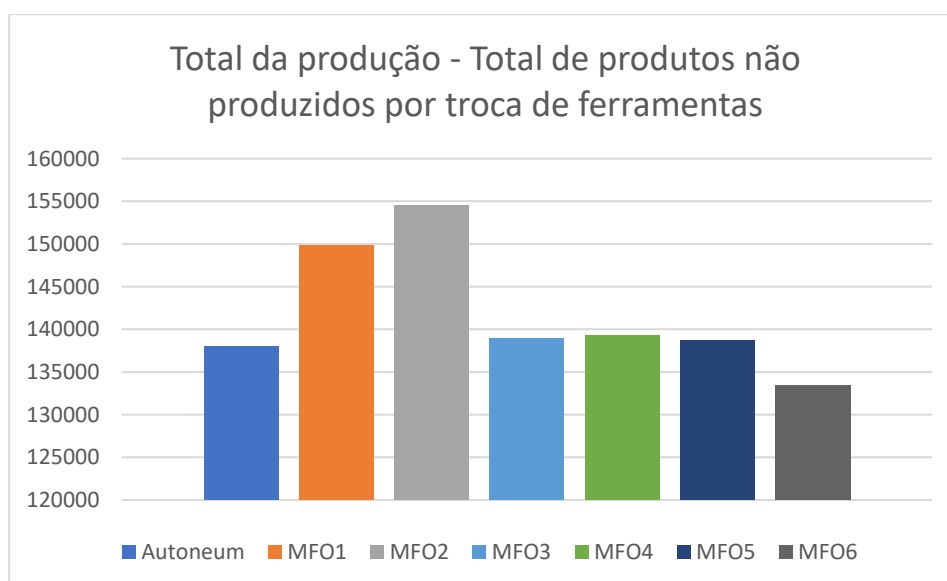


Gráfico 6 - Total da produção – Total de produtos não produzidos por troca de ferramentas

TOTAL DE TEMPO DE PROCESSAMENTO

O Gráfico 7 dá-nos o tempo de processamento das máquinas total, que é calculado através da soma dos tempos de processamento (p_i) multiplicados pelas variáveis X_{imkt} que representam a quantidade a produzir do produto i na máquina m no turno t do dia k .

Como podemos verificar, os planos MFO1 e MFO2 destacam-se como os planos que nos dão maiores valores, o que era expectável uma vez que a sua função objetivo é de maximização da produção. Contrariamente, os restantes planos apresentam valores inferiores ao plano Autoneum, uma vez que as suas funções objetivo são de minimização, em particular no plano MFO6 em que a sua função objetivo era precisamente a minimização do tempo de processamento.

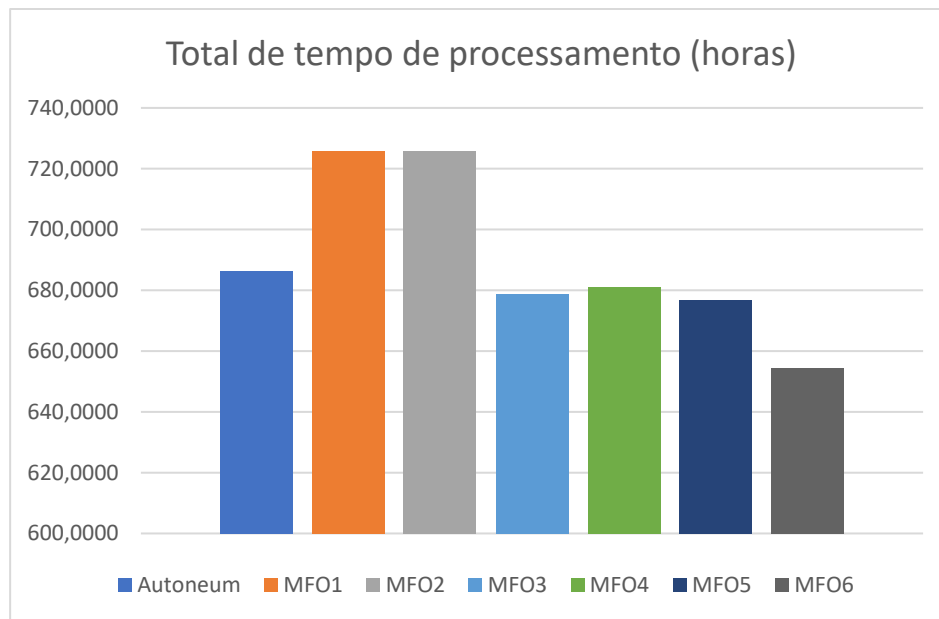


Gráfico 7 - Total de tempo de processamento (horas)

TOTAL DE TEMPO DE EXECUÇÃO

No Gráfico 8 é tido em conta o tempo de execução do modelo pelo *solver* Gurobi Optimizer e, no caso do Plano Autoneum, o tempo de elaboração manual do plano pelo planeador de produção.

Como podemos facilmente verificar, existe uma grande discrepância em relação ao tempo que o planeador de produção demora a elaborar o plano Autoneum e os restantes tempos. É explicável pela demora do processo manual já explicado no capítulo 4.1. Nos restantes planos, verifica-se uma maior demora dos planos MFO3, MFO4, MFO5 e MFO6 em relação aos planos MFO1 e MFO2, que se justifica pelo maior número de iterações na resolução do modelo, no entanto, a diferença não é significativa para que se despreze os modelos em questão. O maior número de iterações deve-se à preponderância de variáveis binárias na função objetivo, o que leva a um maior e mais demorado processo de ramificação da Pesquisa em Árvore por parte do *solver*. Refira-se ainda que apesar de se ter considerado apenas o tempo de execução do *solver*, atualmente ainda ter-se-ia que acrescentar o

tempo de preparação do modelo, nomeadamente o carregamento dos dados necessários à execução do modelo, em particular as encomendas para os cinco dias. Obviamente que, futuramente, este processo de leitura dos dados poderá ser automatizado com funções simples do Excel.

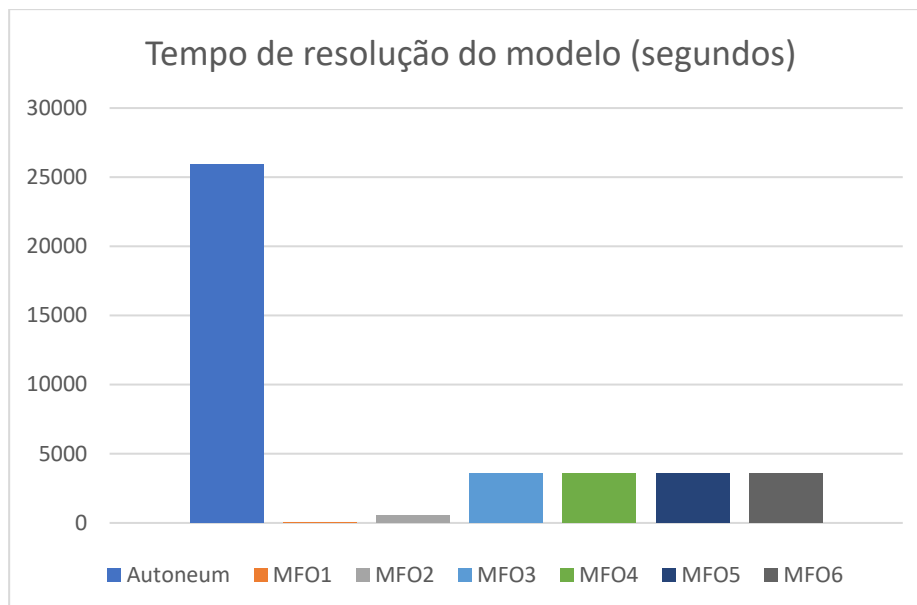


Gráfico 8 - Total de resolução do modelo (segundos)

Capítulo 5 Conclusões

Neste capítulo será elaborada uma síntese do trabalho realizado com as respetivas conclusões e, por fim, serão sugeridas algumas propostas de trabalho futuro.

5.1. Síntese do Trabalho Realizado

A Autoneum é uma empresa multinacional, com sede em Winterthur, Suíça, que desenvolve e produz componentes e sistemas leves, e multifuncionais para proteção contra ruído e calor para quase todos os fabricantes de automóveis em todo o mundo.

A Autoneum tem investido muito no desenvolvimento de novas ferramentas que capacitam as suas fábricas com novas e melhores metodologias, e práticas de controle e planeamento. O melhor exemplo é o sistema integrado de gestão SAP-ERP que a empresa está a implementar nas instalações fabris de Setúbal (Autoneum Setúbal).

Atualmente, o planeamento operacional da produção é executado manualmente pelo planeador de produção, recorrendo ao *software* Excel. A complexidade e a importância das decisões tomadas a este nível exigem uma ferramenta mais sofisticada. Foi desta necessidade que surgiu este trabalho, ou seja, da necessidade de complementar o sistema de gestão que está a ser implementado, através do desenvolvimento de uma ferramenta que auxilie a gestão e administração da fábrica na etapa de planeamento da produção, que receba todas as informações sobre o processo: as previsões, os níveis de *stock* e o plano de entrega, e produza um plano de produção preciso com o planeamento de cada máquina.

Com este objetivo, foi abordado o tema do planeamento de produção ao nível operacional, mais especificamente no que diz respeito ao escalonamento e ao dimensionamento de lotes. Sobre estes dois assuntos, foram revistos os conceitos básicos, a nomenclatura utilizada na literatura, as características dos problemas e todos estes conceitos foram relacionados com a estrutura de produção na Autoneum Setúbal. O processo na fábrica foi, então, caracterizado como um processo de estágio único, com várias máquinas em paralelo (FJS), com tempos de *setup* e segue a estratégia de JIT. No entanto, existem alguns aspetos diferenciadores que tornam incomum uma vez que existem máquinas dedicadas a grupos de produtos, os tempos de preparação são idênticos para todos os produtos e cada produto tem a sua necessidade de operários para a respetiva produção. O processo de produção em si é relativamente simples e é um processo convencional com poucas matérias-primas alocadas para o processo.

O caminho escolhido para o desenvolvimento da ferramenta que auxilie o planeador de produção na etapa de planeamento foi com base nos modelos de programação matemática, mais concretamente os modelos PLIM. No capítulo 3 foram revistos os conceitos básicos relacionados com os modelos e a programação matemática, de modo a se conseguir interpretar os modelos matemáticos existentes na

literatura. Neste mesmo capítulo foi elaborada uma revisão bibliográfica sobre os modelos matemáticos existentes para problemas de escalonamento e de dimensionamento de lotes.

Uma das partes mais importante deste trabalho foi a formulação de todas as condições por trás do processo de produção na fábrica, tais como dados referentes a máquinas, produtos e pedidos. Tendo em conta os pressupostos assumidos e as especificidades do problema em estudo, nenhum dos modelos revistos na literatura se adequou ao caso de estudo apresentado. Como tal, houve necessidade de desenvolver um novo modelo, tendo como base parte dos modelos revistos na literatura. Refira-se ainda a utilidade e o interesse que o modelo desenvolvido poderá revelar para outros problemas reais de dimensionamento de lotes e escalonamento do tipo FJS com tempos de *setup* com os mesmos pressupostos expostos, em particular, no que diz respeito à troca de ferramentas.

Após a caracterização do estudo de caso foi desenvolvido o modelo PLIM com variações na função objetivo, em que as decisões no modelo estão relacionadas com a afetação dos produtos às diferentes máquinas e o dimensionamento dos lotes, cumprindo com os pedidos ao longo da semana. O modelo foi resolvido recorrendo ao *solver* Gurobi Optimizer e os resultados obtidos foram alvo de uma análise detalhada.

Por fim, comparou-se a solução atual do plano Autoneum com as soluções geradas pelo modelo PLIM para as várias funções objetivo, de modo a se confirmar a capacidade do modelo na elaboração do plano de produção na Autoneum Setúbal.

5.2. Conclusões e Propostas de Trabalho Futuro

Os resultados obtidos indicam que a Autoneum pode obter mais valias com a aplicação dos modelos PLIM na etapa de planeamento de produção. Neste estudo de caso, o tempo de elaboração do plano Autoneum pelo planeador de produção foi de 25920 segundos (7,2 horas), enquanto que o maior tempo de resolução do modelo, foram os modelos MFO3, MFO4, MFO5 e MFO6 com 3600 segundos (1 hora). Tendo o planeador de produção de elaborar uma vez por semana o plano de produção, ao longo do ano (48 semanas laborais), a aplicação do modelo na fábrica originava diretamente uma poupança de 297,6 horas laborais por parte do planeador de produção.

O modelo MFO2 foi o que apresentou valores mais semelhantes ao plano Autoneum no número de operários necessários (450 para 451 da Autoneum) e de trocas de ferramenta (20 para 22 da Autoneum), mas, no entanto, apresenta melhores valores no total da produção (156968 para 140569 da Autoneum) e tempo de resolução (509 para 25920 da Autoneum) do plano de produção. O modelo respeitou o intervalo de valores admissíveis para o número de trocas de ferramenta.

As funções objetivo de minimização apresentaram valores muito interessantes na troca de ferramentas. O modelo MFO6 conseguiu uma redução de 22 trocas de ferramentas da Autoneum para 16 trocas e os modelos MFO3, MFO4, MFO5 para 17 trocas, conseguindo uma clara diminuição do número de troca de ferramentas, o que seria de grande interesse. Atualmente a equipa de troca de

ferramentas da fábrica opera próximo no limite das suas capacidades e estes modelos vinham resolver esse tipo de problema. Os modelos, como esperado, respeitaram o intervalo de valores admissíveis para o número de trocas de ferramenta.

Por fim, os modelos MFO3 e MFO5 conseguiram um valor bastante interessante no que diz respeito à redução do número de operários (451 da Autoneum para 439), o que seria muito interessante numa situação de redução do número de operários a laborar na fábrica da Autoneum Setúbal. O modelo também respeitou o intervalo de valores admissíveis para o número de trocas de ferramenta.

O objetivo deste trabalho foi conseguido ao ser desenvolvida uma ferramenta em formato excel, com seis variantes do modelo, em que a empresa poderá optar por utilizar a que for de mais encontro ao seus objetivos no momento. A ferramenta visa auxiliar a gestão e administração da fábrica na etapa de planeamento da produção, nomeadamente a tomada de decisão em relação ao dimensionamento de lotes e escalonamento de produção. A utilização destes modelos facilitará e simplificará a tarefa do planeador de produção e, simultaneamente, otimizará o plano de produção da fábrica.

Como primeira proposta de trabalho futuro, sugere-se a introdução de novas restrições no modelo desenvolvido de modo a assegurem a produção em quantidades múltiplas por embalagem e quantidades mínimas de *stock*. Uma segunda proposta, esta de maior relevância, seria fazer uma abordagem ao problema em estudo com programação linear multiobjectivo (PLM), de modo a considerar duas ou mais funções objetivo no mesmo modelo. Refira-se que um problema de otimização multiobjectivo é, do ponto de vista meramente matemático, indeterminado, pois a ideia de solução ótima, tal como a conhecemos nos problemas com um único objetivo, deixa de fazer sentido. Na otimização com vários objetivos raramente existe uma solução admissível que otimize todos os critérios em simultâneo, mas, no entanto, poderá dar-nos uma solução de compromisso mais funcional e próxima da realidade. Como podemos verificar neste trabalho, com as seis funções objetivo, o planeador de produção é confrontado com a exigência da escolha da melhor decisão. Com a implementação de uma abordagem multiobjetivo seria possível o desenvolvimento de um método de apoio à decisão com o intuito de apoiar o planeador na obtenção de uma solução de compromisso satisfatória que fosse ao encontro das suas expetativas.

Concluindo, este trabalho estreitou o contato entre a indústria automóvel através da Autoneum Setúbal e o IPS, numa perspetiva de novas oportunidades e partilha de conhecimentos. A Autoneum Setúbal ficou bastante agradada com os resultados deste projeto de mestrado e procederá a uma avaliação, com a concordância do Grupo Autoneum, para uma possível continuação do trabalho. Numa primeira fase, pretendia-se melhorar o modelo e enquadrá-lo numa abordagem multiobjetivo e, numa segunda fase, implementar a ferramenta desenvolvida na fábrica de Setúbal e, posteriormente, estender às restantes fábricas do grupo.

Bibliografia

- Allahverdi, A. N., Cheng, T., & Kovalyov, M. Y. (2008). A survey of scheduling problems with setup times or costs. *European Journal of Operational Research* 187, pp. 985-1032.
- Araujo, S. A., & Arenales, M. N. (2003). Dimensionamento de lotes e programação do forno numa fundição automatizada de porte médio. *Pesquisa Operacional* 23, pp. 403-420.
- Assis, R. (2018). Planeamento e Controlo da Produção. Obtido de rassis: <http://rassis.com/>
- Autoneum. (2018). Obtido de autoneum: www.autoneum.com
- Barco, C. F., & Villela, F. B. (2008). XXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO: A integração de cadeias produtivas com a abordagem da manufatura sustentável. Análise dos sistemas de programação e controle da produção.
- Bellington, P. J., McClain, J. O., & Thomas, L. J. (1983). Mathematical Programming Approaches to Capacity - Constrained MRP Systems: Review, Formulation and Problem Reduction. *Management Science* 39, pp. 1126-1141.
- Chase, R. B., Jacobs, F. R., & Aquilano, N. J. (2006). *Operations Management for Competitive Advantage*. Nova Iorque: McGraw-Hill.
- Cheng, T., & Podolsky, S. (1996). *Just-in-Time Manufacturing: An Introduction*, 2ª Edição. Londres: Chapman & Hall.
- Chibeles-Martins, N. (2010). A Meta-Heuristics Approach for the Design and Scheduling of Multipurpose Batch Plants. In *20th European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, pp. 1315-1320.
- Chibeles-Martins, N. (2011). A Simulated Annealing Approach for the BiObjective Design and Scheduling of Multipurpose Batch Plants. In *21st European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, pp. 865-869.
- Clark, A., Alamada-Lobo, B., & Alveder, C. (2011). Lot sizing and scheduling: industrial extensions and research opportunities. *International Journal of Production Research* 49, pp. 2457-2461.
- Copil, K., Wörbelauer, M., Meyr, H., & Tempelmeier, H. (2017). Simultaneous lotsizing and scheduling problems: a classification and review of models. *OR Spectrum* 39, pp. 1-64.
- Courtois, A., Pillet, M., & Martin- Bonnefous, C. (2003). *Gestão da Produção*. Lidel.
- Davenport, A. J., & Beck, J. C. (2000). A survey of techniques for scheduling with uncertainty. Obtido de <http://www.mie.utoronto.ca/staff/profiles/beck/publications.html>
- Fattahi, P., Saidi Mehrabad, M., & Jolai, F. (2007). Mathematical modeling and heuristic

- approaches to flexible job shop scheduling problems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, pp. 331–342.
- Gao, J., Sun, L., & Gen, M. (2008). A hybrid genetic and variable neighborhood descent algorithm for flexible job shop scheduling problems. In *Computers & Operations Research*, pp. 2892–2907.
- Gomes, M. (2007). *Reactive scheduling in make-to-order production systems: An optimization based approach*. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa.
- Gomes, M., Barbosa-Póvoa, A., & Novais, A. (2005). Optimal scheduling for flexible job shop operation. *International Journal of Production Research*, pp. 2323–2353.
- Gomes, M., Barbosa-Póvoa, A., & Novais, A. (2008). Scheduling of job shop, make-to-order industries with recirculation and assembly: a MILP approach. In *2008 IEEE International Engineering Management Conference*
- Gonçalves, G. (2017). *Indústria 4.0: Como as Empresas Estão Utilizando a Simulação para se preparar para o Futuro*. Minas Gerais: Faculdade Pitágoras.
- Gurobi Optimizer Software. (2019). Obtido de Gurobi Optimization Inc.: <http://www.gurobi.com>
- Harris, F. W. (1913). How many parts to make at once, in a factory. *Management Science* 10, pp. 135-136.
- Józefowska, J. (1998). Local search metaheuristics for discrete–continuous scheduling problems. *European Journal of Operational Research*, pp. 354–370.
- Karimi, B., Fatemi Ghomia, S. M., & Wilson, J. M. (2003). The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms, *Omega*. pp. 365-378.
- Kim, D. W. (2002). Unrelated parallel machine scheduling with setup times using simulated annealing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, pp. 223–231.
- Le Pape, C. (2005). *Constraint-based scheduling: A tutorial*. Proceedings of the 1st International Summer School on Constraint Programming.
- Logendran, R., McDonell, B., & Smucker, B. (2007). Scheduling unrelated parallel machines with sequence-dependent setups. *Computers & Operations Research*, pp. 3420–3438.
- Luz, C., & Pereira, A. (2015). *Investigação Operacional (Sebenta)*. Setúbal.
- Ma'ruf, A. (2007). *Production System-Traditional Production System*. Obtido de Manufacturing Research Group, Institut Teknologi Bandung: <http://www.itb.ac.id/en>
- Manne, A. S. (1960). On the job-shop scheduling problem. *Operations Research* 8, pp. 219–223.
- Marques, I. (2018). *Operating room planning and scheduling: real Portuguese cases*. Seminário

ESTSetúbal/IPS.

- Mason, A. J. (2012). OpenSolver – An Open Source Add-in to Solve Linear and Integer Programmes in Excel, *Operations Research Proceedings 2011*, eds. Klatte, Diethard, Lüthi, Hans-Jakob, Schmedders, Karl, Springer Berlin Heidelberg. pp. 401-406; http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-29210-1_64, <http://opensolver.org>.
- Melo, R. A., & Ribeiro, C. C. (2017). Formulations and heuristics for the multi-item uncapacited lot-sizing problem with inventory bands, *International Journal of Production Research*, pp. 576-592.
- Paez, O., Dewees, J., Genaidy, A., Tuncel, S, Karwowski, W., Zurada, J. (2004). The lean manufacturing enterprise: An emerging sociotechnological system integration. *Human Factors in Ergonomics in Manufacturing* 14, pp. 285-306.
- Pinedo, M. L. (2012). *Scheduling - Theory. Algorithms and Systems*. New York: Springer Books.
- Pinto, J. (2010). *Gestão de operações na indústria e nos serviços*. 3ª Edição. Lisboa: Lidel.
- Pires, S. (2004). *Gestão da Cadeia de Suprimentos (Supply Chain Management): Conceitos, Estratégias, Práticas e Casos*. São Paulo.
- Pochet, Y., & Wolsey, L. A. (2006). *Production Planning Using Mixed Integer Programming*. Springer.
- Ronconi, D., & Birgin, E. (2010). Mixed-integer programming models for flowshop scheduling problems minimizing the total earliness and tardiness. *Just-in-Time Systems*, pp. 91-105.
- Russomano, V. (1995). *Planejamento e Controlo da Produção*. São Paulo: Pioneira.
- Santos, G., & Barbosa, R. J. (2007). *Planejamento Estratégico da Produção*. *Revista Científica Eletrónica de Administração*.
- Smalley, A. (2004). *Creating Level Pull*. Massachusetts: The Lean Enterprise Institute.
- Stevenson, W. J. (2005). *Operations Management*. Boston: McGraw-Hill/Irwin.
- Tersine, R. (1985). *Production/Operation Management: Concepts, Structure and Analysis*. North Holland.
- Thomaz, M. (2015). *Balanced ScoreCard e Hoshin Kanri: Alinhamento Organizacional e Execução da Estratégia*. Lisboa: Biblioteca Lean.
- Trigeiro, W. W., Thomas, L. J., & McClain, J. O. (1989). Capacitated Lot Sizing with Setup Times, *Management Science*, pp. 353-366.
- Virgílio, B. E. (2011). *Optimização do planeamento e escalonamento da produção na indústria de moldes: Aplicação ao caso da GECO*. Dissertação de Mestrado em Engenharia e

- Gestão Industrial. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Vollmann, T. E., Berry, W. L., & Whybark, D. C. (1997). *Manufacturing planning and control systems*. Boston: Irwin.
- Vollmann, T. E., Berry, W. L., Whybark, D. C., & Jacobs, F. R. (2005). *Manufacturing planning and control for supply chain management*. New York: McGraw-Hill/Irwin.
- Wagner, H. M. (1959). An integer linear-programming model for machine scheduling. *Naval Research Logistic* 6, pp. 131–140.
- Wagner, H. M., & Whitin, T. M. (1958). Dynamic Version of the Economic Lot Sizing Model. *Management Science* 5, pp. 89-96.
- Wilson, J. M. (1989). Alternative formulations of a flow-shop scheduling problem. *Journal of the Operational Research Society* 40, pp. 395–399.
- Zhu, Z., & Heady, R. B. (2000). Minimizing the sum of earliness/tardiness in multi-machine scheduling: a mixed integer programming approach. *Computers & Industrial Engineering* 38, pp. 297-305.

